

Agustín Domingo

Apuntes de Acústica

Agustín Martín Domingo

Copyright

Esta obra “*Apuntes de Acústica*” (texto y figuras) es:

Copyright (C) 2005-2013 Agustín Martín Domingo <agustin6martin@gmail.com>

con las siguientes excepciones:

- La figura 2–9 está extraída de la Wikipedia, el código de su autor es *Noodle snacks* y se ha cedido por el mismo al dominio público.
- La imagen de la figura 2–11 es Copyright (C) 2005 Asahiko y ha sido cedida por su autor al dominio público.

Algunos derechos reservados.

Versión 2.0, diciembre de 2013.

Licencia de distribución

Esta obra se distribuye bajo una licencia *Creative Commons* Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 España (CC-BY-SA-NC). Para ver una copia de esta licencia, visite la página de la licencia

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es>

o envíe una carta a Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, EEUU.

Estos apuntes se hacen públicos con la intención de que sean útiles. Aunque se ha tenido cuidado durante su preparación no puede descartarse que aún contengan errores. El autor no garantiza que el contenido de estos apuntes esté libre de errores.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Spain License. To view a copy of this license, visit

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>

or send a letter to Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.

These notes are provided in the hope they are useful. While precaution has been taken during its preparation, it is possible that notes still contain some errors. There is absolutely no warranty about its contents.

Resumen de la licencia:

Está permitido...

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra
- Hacer obras derivadas

Bajo las siguientes condiciones

Reconocimiento: Se deben reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador.

No comercial: No se puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Compartir bajo la misma licencia: Si se altera o se transforma esta obra, o se genera una obra derivada, sólo se puede distribuir la obra generada bajo una licencia similar a ésta.



Indice

1. Acústica física y psicoacústica	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Análisis espectral del sonido.	2
1.2.1. Bandas de octava y de tercio de octava.	3
1.3. Niveles acústicos.	5
1.3.1. Niveles y ganancias acústicas.	6
1.3.2. Composición de niveles acústicos.	7
1.3.3. El efecto del ruido de fondo.	8
1.4. Tipos de ruido y niveles de ruido.	9
1.4.1. Tipos de ruidos según intensidad y evolución temporal.	9
1.4.2. Tipos de ruidos según composición en frecuencias.	9
1.4.3. Índices de ruido.	10
1.5. Fuentes sonoras.	12
1.5.1. Fuente omnidireccional.	12
1.5.2. Fuente direccional.	12
1.6. Psicoacústica.	13
1.6.1. Sonoridad.	14
1.6.2. Nivel de sonoridad: Escala de fonios y líneas isofónicas.	14
1.6.3. Sonoridad: Escala de sonios.	16
1.6.4. Redes de ponderación.	18
1.7. Enmascaramiento	20
2. Acústica de salas.	21
2.1. Introducción.	21
2.1.1. El coeficiente de absorción en acondicionamiento acústico.	22
2.1.2. Distintas contribuciones al campo acústico en un recinto.	22
2.2. Energía del campo reverberante.	23
2.2.1. El modelo de Sabine para la densidad de energía	23
2.2.2. El recorrido libre medio	28
2.3. El tiempo de reverberación.	29
2.3.1. La fórmula de Sabine para el tiempo de reverberación.	30
2.3.2. Otras expresiones para el tiempo de reverberación.	31
2.3.3. El tiempo de reverberación óptimo.	33
2.3.4. Otros parámetros de calidad acústica.	34
2.4. El campo acústico en un recinto	34
2.5. Reducción del nivel sonoro	36
2.6. Materiales acústicos y su disposición	37
2.6.1. Reflectores acústicos	38
2.6.2. Difusores acústicos	38
2.6.3. Materiales y sistemas absorbentes	39
2.6.4. Algunas normas genéricas de diseño.	44
Referencias	47
Indice alfabético	49
Glosario de términos	51

Augustine's Moral Dilemma

Capítulo 1

Acústica física y psicoacústica

Índice

1.1. Introducción.	1
1.2. Análisis espectral del sonido.	2
1.2.1. Bandas de octava y de tercio de octava.	3
1.3. Niveles acústicos.	5
1.3.1. Niveles y ganancias acústicas.	6
1.3.2. Composición de niveles acústicos.	7
1.3.3. El efecto del ruido de fondo.	8
1.4. Tipos de ruido y niveles de ruido.	9
1.4.1. Tipos de ruidos según intensidad y evolución temporal.	9
1.4.2. Tipos de ruidos según composición en frecuencias.	9
1.4.3. Índices de ruido.	10
1.5. Fuentes sonoras.	12
1.5.1. Fuente omnidireccional.	12
1.5.2. Fuente direccional.	12
1.6. Psicoacústica.	13
1.6.1. Sonoridad.	14
1.6.2. Nivel de sonoridad: Escala de fonios y líneas isofónicas.	14
1.6.3. Sonoridad: Escala de sonios.	16
1.6.4. Redes de ponderación.	18
1.7. Enmascaramiento	20

1.1. Introducción.

Denominamos *Acústica* a la rama de la Física que estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción y reproducción del sonido. El sonido consiste en una variación en la presión de un medio elástico, como el aire o el agua, que se propaga a través de la materia, bien sea en estado gaseoso, líquido o sólido, en pequeñas fluctuaciones rápidas llamadas *ondas sonoras*. El sonido no se propaga en el vacío.

La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera.

El sonido en el aire se genera al crearse una variación o perturbación que establece una serie de ondas de presión (ondas sonoras) que fluctúan por encima y por debajo de la presión del aire en el equilibrio (la atmosférica) y que, en general, se propagan en todas las direcciones desde la fuente sonora. Nuestro oído es sensible a estas fluctuaciones de presión y las convierte en impulsos eléctricos que se transmiten al cerebro para su interpretación.

Al analizar el sonido existen tres elementos a considerar: la *fente emisora*, que puede ser bien deseable o bien indeseable; el *medio* a través del que se produce la transmisión del sonido y finalmente el *receptor*.

Cuando se desea escuchar el sonido (p.ej. palabra o música) es necesario optimizar las condiciones de producción, transmisión y recepción, mientras que si lo que se desea es no recibir el sonido habrá que hacer justo lo contrario.

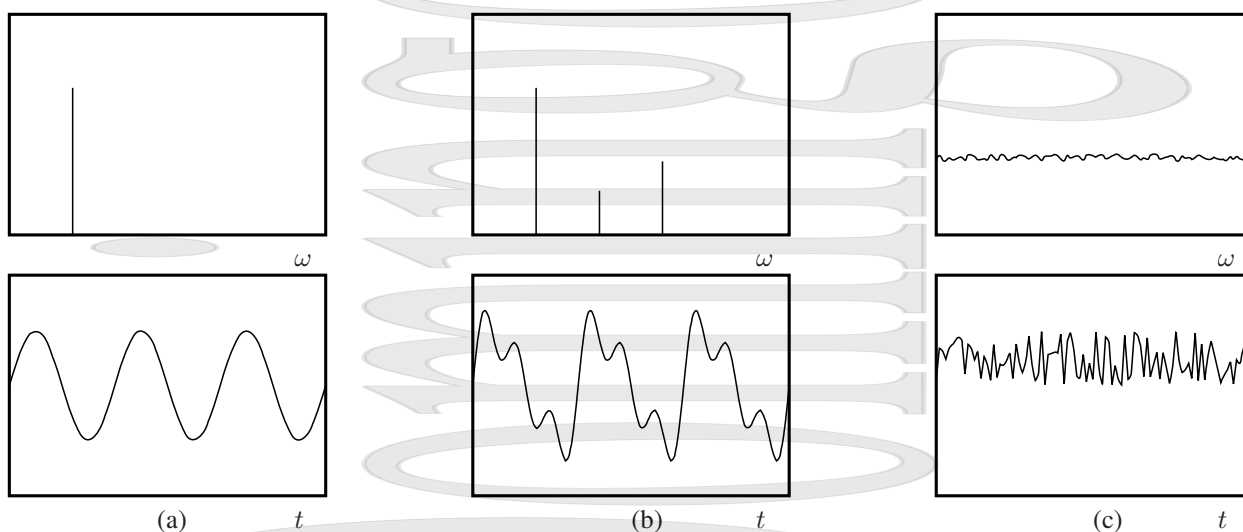


Figura 1-1: Ejemplos de distintos tipos de sonido dependiendo de su composición espectral, representados en función de la frecuencia (arriba) y del tiempo a una posición fija (abajo). (a) corresponde a un tono puro compuesto de una única frecuencia, (b) a un sonido compuesto de varias frecuencias discretas (en este caso tres) y (c) a un sonido aleatorio.

Las fuentes sonoras que afectan a los edificios y a las personas son muchas y muy variadas, yendo desde la voz humana, las actividades humanas, sonidos exteriores como los debidos al tráfico o a aviones, etc. . . hasta los debidos a maquinaria e instalaciones dentro de los mismos edificios.

Al igual que en el aire, el sonido puede viajar por materiales sólidos y líquidos. Dependiendo del medio por el cual el sonido viaja en un momento dado hablamos de *sonido aéreo* y *sonido estructural*. El sonido puede originarse en el aire, viajar por el aire, ser captado por una estructura, propagarse por la misma y ser finalmente reemitido de nuevo al aire.

1.2. Análisis espectral del sonido.

El sonido que nos llega es, en general, superposición de ondas sonoras de distintas frecuencias. Denominamos *banda de audiofrecuencias* a la gama de frecuencias audibles. El oído humano puede escuchar[†] frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz, aunque es más sensible en el intervalo entre 1 y 5 kHz. Por otra parte en música sólo se emplean sonidos en el rango entre 30 Hz y 12 kHz.

El caso más sencillo de sonido corresponde a un *tono puro*, en el que la onda de sonido que se propaga puede representarse por una función armónica, que contiene una única frecuencia. Cualquier sonido periódico puede representarse por una superposición discreta de tonos puros, de acuerdo con el teorema de Fourier, cada uno de ellos con su correspondiente intensidad. Asimismo, cualquier función describiendo un sonido complejo puede representarse mediante una integral de Fourier en la que puede aparecer un continuo de frecuencias en vez de la serie de frecuencias discretas que teníamos para una función periódica.

Denominamos *ultrasonidos* a los sonidos cuya frecuencia es mayor que el límite superior de audición (20 kHz) e *infrasonidos* a aquéllos de frecuencia menor que el límite inferior de audición (20 Hz).

El estudio de los ultrasonidos constituye una rama especial de la Acústica. Éstos tienen aplicaciones en campos muy distintos, que van desde la metalurgia (para el ensayo no destructivo de materiales) hasta la Medicina (en diagnósticos y en tratamientos), pasando por sistemas de limpieza, alarmas, etc. . . Por otra parte, los infrasonidos, aunque tienen algunas aplicaciones industriales (sismología, ensayo del comportamiento de estructuras), son especialmente importantes por sus efectos biológicos perniciosos. En pequeñas intensidades actúan, a través de los conductos acústicos,

[†] Éstos límites dependen de las personas, sobre todo el límite superior.

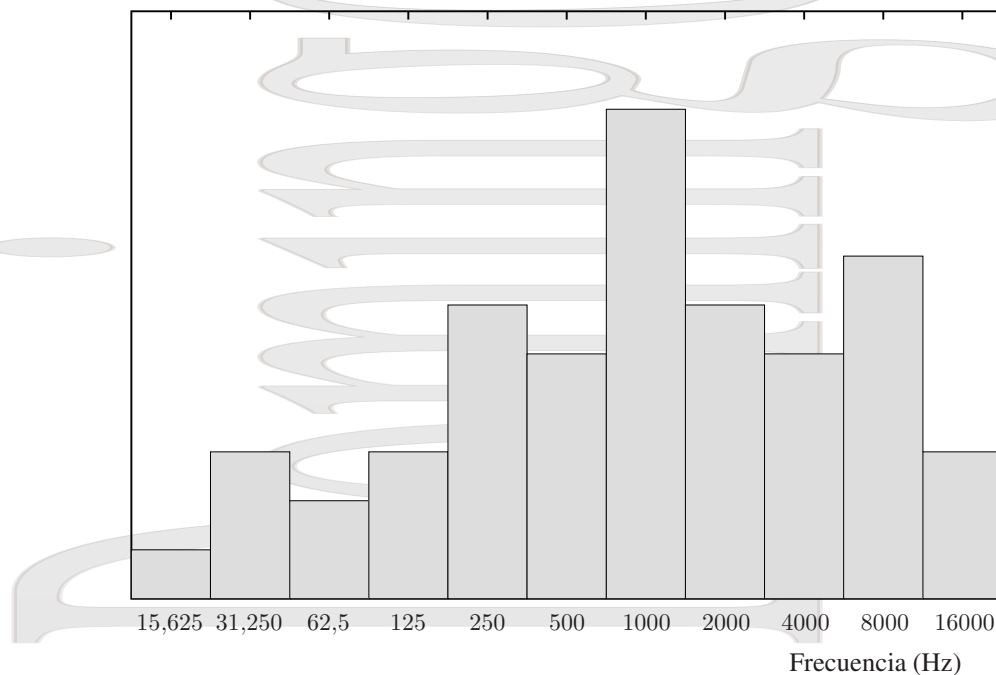


Figura 1-2: Bandas de octava en la banda de audiofrecuencias.

sobre los órganos de equilibrio del cerebro, pudiendo producir vértigos, mareos y náuseas. En grandes intensidades pueden producir hemorragias internas como consecuencia de fricciones entre órganos del oído. En general pueden producir incluso fatiga nerviosa, alergias y anomalías digestivas, visuales y auditivas. La frecuencia más perjudicial es 7 Hz, que coincide con la frecuencia de las ondas alpha de los electroencefalogramas (que son las ondas de reposo del cerebro), por lo que todo trabajo intelectual se hace imposible en presencia de infrasonidos de esa frecuencia.

Cualquier sonido sencillo, como es el caso de una nota musical, puede describirse mediante tres parámetros: la *intensidad*, el *tono* y el *timbre*, que corresponden a tres características físicas: la amplitud, la frecuencia y la composición espectral (o en frecuencias), dada por la forma de la onda.

La intensidad, como veremos más adelante, está asociada a la cantidad de energía que lleva la onda por unidad de tiempo y de superficie en la dirección de propagación. El tono está asociado con la frecuencia de la componente principal del sonido (o armónico fundamental) y el timbre con las intensidades relativas de otras frecuencias además de la frecuencia fundamental.

Se denomina *ruido* a un sonido que contiene una combinación aleatoria de frecuencias, aunque con frecuencia se utiliza la palabra ruido para todo sonido que distrae, incomoda o daña al receptor humano y perturba sus actividades cotidianas (trabajo, descanso, entretenimiento, estudio, salud, etc.) en un momento dado.

1.2.1. Bandas de octava y de tercio de octava.

Salvo los tonos puros o los sonidos compuestos de un pequeño número de tonos puros, la mayoría de los sonidos están compuestos de una amplia variedad de frecuencias. Esto es cierto para la palabra y la música, pero especialmente para el ruido, lo que hace necesario tener en cuenta cada una de las frecuencias en el análisis acústico, con las complicaciones que esto lleva aparejado.

Por simplicidad, en vez de analizar cada componente en frecuencias por separado se analiza el problema en una serie de intervalos de frecuencias que cubren todo el espectro de interés, cada uno de ellos caracterizado por una cierta frecuencia, a la que se asigna toda la energía acústica correspondiente a dicho intervalo. A cada uno de esos intervalos se le denomina *banda de octava* y cumplen que su frecuencia superior es el doble de su frecuencia inferior,

$$\nu_{\text{sup}} = 2\nu_{\text{inf}}. \quad (1-1)$$

Tabla 1-1: Características de las principales bandas de octava. Junto a la frecuencia central de cada banda se muestra la longitud de onda correspondiente para el sonido propagándose en el aire a una velocidad de 340 ms^{-1} , $\lambda = c/\nu$.

	Centro de la banda (Hz)	(cm)	Frec. inferior (Hz)	Frec. superior (Hz)	Ancho de banda (Hz)
$1000 \cdot 2^{-6}$	15,62	2159,5	11,05	22,10	11,05
$1000 \cdot 2^{-5}$	31,25	1079,4	22,10	44,19	22,10
$1000 \cdot 2^{-4}$	62,50	539,7	44,19	88,39	44,19
$1000 \cdot 2^{-3}$	125	272	88,39	176,78	88,39
$1000 \cdot 2^{-2}$	250	136	176,78	353,55	176,78
$1000 \cdot 2^{-1}$	500	68	353,55	707,11	353,55
$1000 \cdot 2^0$	1000	34	707,11	1414,21	707,11
$1000 \cdot 2^1$	2000	17	1414,21	2828,43	1414,21
$1000 \cdot 2^2$	4000	8,5	2828,43	5656,85	2828,43
$1000 \cdot 2^3$	8000	4,25	5656,85	11313,71	5656,85
$1000 \cdot 2^4$	16000	2,1	11313,71	22627,42	11313,71

Las bandas de octava se denominan por el valor de la denominada *frecuencia central*, que es la media geométrica de las frecuencias superior e inferior,

$$\nu_{\text{central}} = \sqrt{\nu_{\text{sup}} \nu_{\text{inf}}} = \sqrt{2} \nu_{\text{inf}}. \quad (1-2)$$

El *ancho de banda* es la diferencia entre los límites superior e inferior de la banda de octava,

$$\Delta\nu = \nu_{\text{sup}} - \nu_{\text{inf}} = \nu_{\text{inf}} = \nu_{\text{central}} / \sqrt{2}. \quad (1-3)$$

Cuando se toma 1000 Hz como patrón de frecuencias, el criterio para construir las bandas de octava es $\nu_{\text{central}}(n) = 1000 \cdot 2^n$, con $-6 \leq n \leq 4$, como corresponde a las bandas de octava que se muestran en la figura 1-2 y en la tabla 1-1.

El criterio anterior se denomina *criterio acústico* ya que es el que se comúnmente se utiliza en Acústica, pero a veces aparecen otros criterios, dependiendo del campo de aplicación. Por ejemplo, según el *criterio matemático*, las frecuencias centrales vendrían dadas por 2^n , con $4 \leq n \leq 14$ y serían 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 9192 y 16384. El *criterio fisiológico* toma como referencia inferior la frecuencia de 20 Hz, y las bandas centrales vendrían dadas por 20×2^n , con $0 \leq n \leq 10$, siendo éstas 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120, 10240 y 20480.

Nótese que, independientemente del criterio, el margen entre las frecuencias audibles límite más grave y más aguda contiene 10 bandas de octava, es decir, la extensión de la banda de audiofrecuencias es de 10 bandas de octava. Las bandas de octava que acabamos de definir cubren algo más que el espectro de audiofrecuencias.

Para medidas de mayor precisión, cada banda de octava se divide en tres *bandas de tercios de octava*, de forma que la relación entre las frecuencias superior e inferior de cada banda de tercio de octava es $\sqrt[3]{2}$ y las relaciones entre las distintas frecuencias vienen dadas por

$$\nu_{\text{sup}} = \sqrt[3]{2} \nu_{\text{inf}} \simeq 1,26 \nu_{\text{inf}} \quad (1-4)$$

$$\nu_{\text{central}} = \sqrt{\nu_{\text{sup}} \nu_{\text{inf}}} = \sqrt[6]{2} \nu_{\text{inf}} \simeq 1,12 \nu_{\text{inf}} \quad (1-5)$$

$$\Delta\nu = \nu_{\text{sup}} - \nu_{\text{inf}} = (\sqrt[3]{2} - 1) \nu_{\text{inf}} = \frac{\sqrt[3]{2} - 1}{\sqrt[6]{2}} \nu_{\text{central}} \simeq 0,23 \nu_{\text{central}} \quad (1-6)$$

En música también se utilizan bandas de octava, pero subdivididas en *bandas de doceavo de octava*, de forma que cada

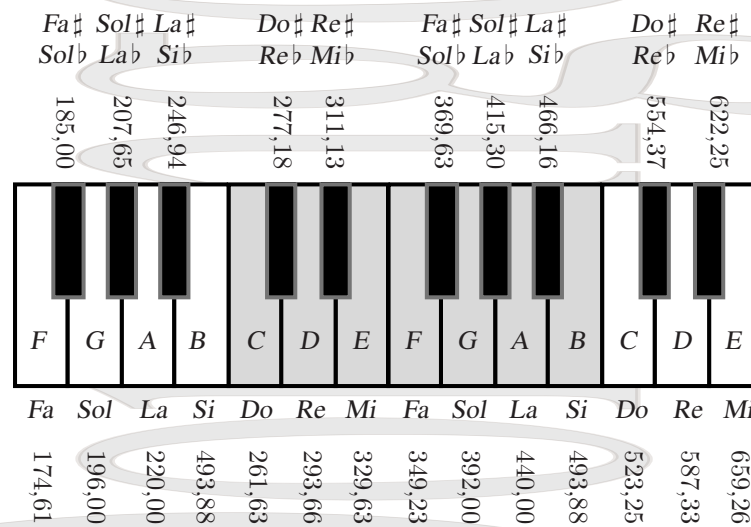


Figura 1-3: Bandas de doceavo de octava en el piano en el entorno de la octava central. Junto a las frecuencias centrales (en Hz) de cada una de estas bandas se muestran los nombres latinos de cada nota. Sobre las teclas se muestran los nombres de las notas básicas en notación inglesa.

octava musical contiene doce subdivisiones que cumplen

$$\nu_{\text{sup}} = \sqrt[12]{2} \nu_{\text{inf}} \simeq 1,06 \nu_{\text{inf}} \quad (1-7)$$

$$\nu_{\text{central}} = \sqrt{\nu_{\text{sup}} \nu_{\text{inf}}} = \sqrt[24]{2} \nu_{\text{inf}} \simeq 1,03 \nu_{\text{inf}} \quad (1-8)$$

$$\Delta\nu = \nu_{\text{sup}} - \nu_{\text{inf}} = (\sqrt[12]{2} - 1) \nu_{\text{inf}} = \frac{\sqrt[12]{2} - 1}{\sqrt[24]{2}} \nu_{\text{central}} \simeq 0,058 \nu_{\text{central}} \quad (1-9)$$

denominándose *semitono* al intervalo entre dos de estas subdivisiones. La gama musical contiene una repetición de estas bandas de octava. En el *criterio musical* se toman los 440 Hz como frecuencia central de la banda de doceavo de octava de referencia a la que se asigna el *La* en la notación latina[†] (*A* en la notación inglesa) de la octava central, derivándose de ahí el resto. En la figura 1-3 se muestran las frecuencias centrales para algunas bandas de doceavo de octava en el entorno de la octava central del piano.

1.3. Niveles acústicos.

La referencia patrón de intensidad para sonidos aéreos es de 10^{-12} W/m^2 que equivale a la intensidad de un tono puro de 1 kHz en el límite de audibilidad de una persona de audición normal. La presión de pico correspondiente es $\wp_{\text{máx}} = \sqrt{2\rho_0 c I} = 2,89 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ y la presión eficaz $\wp_{\text{ef}} = \wp_{\text{máx}}/\sqrt{2} = 20,4 \mu\text{Pa}$. Esta presión, simplificada a $20 \mu\text{Pa}$ suele utilizarse como referencia para los niveles de presión sonora en el aire. El nivel de dolor se encuentra aproximadamente en 1 W/m^2 , que corresponde a una presión máxima de unos 28 Pa y a una eficaz de 20 Pa.

Esta intensidad umbral depende de la frecuencia, y por tanto también la presión umbral. Por ejemplo, a 40 Hz, la intensidad umbral es de $6 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$, a 100 Hz es de $7 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ y a 10000 Hz de $8 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Salvo que se especifique otra cosa, se tomará 10^{-12} W/m^2 como referencia de intensidad umbral para todas las frecuencias.

Al igual que ocurría en las frecuencias (con un rango entre 20 Hz y 20 kHz), la gama de presiones (entre $20 \mu\text{Pa}$ y 100 Pa) e intensidades (entre 10^{-12} y 1 W/m^2) dentro del campo de audición es tan grande que es aconsejable el uso de escalas logarítmicas que comprimen el rango de órdenes de magnitud necesarios para describir este gran intervalo

[†] Los nombres latinos de las notas musicales provienen del canto gregoriano himno a San Juan Bautista, popular en la Edad Media. Posteriormente se cambió el nombre de la nota *Ut* por el más fácilmente pronunciable *Do*. La notación inglesa es una notación alfabética derivada de la notación griega, en la que nombraban las notas desde la letra alpha hasta la gamma siendo alfa nuestro *La* y gamma nuestro *Sol*.

Tabla 1-2: Niveles de intensidad de algunos sonidos comunes

Sonido	Nivel (dB)	Efecto	Nivel musical
Zona de despegue de un cohete sin protección auditiva.	180	Pérdida irreversible del oído	
Operación en pista de reactor (25 m). Sirena de ataque aéreo	140	Fuerte dolor	
Trueno	130		
Avión de hélice (50 m)	120	Umbral del dolor	
Martillo neumático a 1 m	110	Extremadamente fuerte	
Tren o petardos	100	Muy fuerte	
Camión pesado a 151 m. Cataratas del Niágara	90	Muy molesto. Daño auditivo a alta exposición (8 h.)	fortissimo (<i>fff</i>)
Despertador a 60 cm o secador de pelo	80	Molesto	molto forte (<i>ff</i>)
Restaurante ruidoso o tráfico abundante	70	Difícil audición	forte (<i>f</i>)
Conversación normal (1 m)	60	Intrusivo	moderato (<i>mf</i>)
Oficina tranquila, conversación en voz baja	50	Calmo	piano (<i>p</i>)
Biblioteca, música suave	40		molto piano (<i>pp</i>)
Susurro a 5 m	30	Muy calmo	pianissimo (<i>ppp</i>)
Susurro de hojas	20		
Respiración	10	Apenas audible	
Aleteo de una mariposa	0	Umbral de audición	

de intensidades, frecuencias o presiones. Es más, cuando la intensidad del sonido crece en progresión geométrica el aumento de la sensación sonora que el oído percibe se asemeja más a una progresión lineal (según la denominada ley de *Weber-Fechner*). Esto es característico de un comportamiento logarítmico.

1.3.1. Niveles y ganancias acústicas.

Por las razones que acabamos mencionar, en Acústica las magnitudes se miden en niveles, siempre referidas a un valor de referencia que constituye el cero de la escala de medida.

El *nivel de intensidad* de un sonido de intensidad I se define por

$$L_I = \text{SIL} = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] \quad I = I_{\text{ref}} 10^{\frac{L_I}{10}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1-10a)$$

donde dB es una unidad adimensional de medida y la intensidad umbral 10^{-12} W/m^2 se toma como intensidad de referencia. En la tabla 1-2 se dan valores del nivel de intensidad para una serie de sonidos comunes.

El *nivel de presión* de un sonido de presión sonora \wp se define por

$$L_P = \text{SPL} = 20 \log \frac{\wp}{\wp_{\text{ref}}} = 10 \log \frac{\wp^2}{\wp_{\text{ref}}^2} \quad [\text{dB}] \quad \wp = \wp_{\text{ref}} 10^{\frac{L_P}{20}} \quad [\text{Pa}] \quad (1-10b)$$

donde la presión efectiva de referencia es la umbral ($20 \mu\text{Pa}$).

Análogamente, se define el *nivel de potencia acústica* de una fuente de potencia \dot{W} como

$$L_W = \text{SWL} = 10 \log \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] \quad \dot{W} = \dot{W}_{\text{ref}} 10^{\frac{L_W}{10}} \quad [\text{W}] \quad (1-10c)$$

donde se toma 10^{-12} W como potencia acústica de referencia.

Para ondas planas o esféricas lejos de la fuente se cumple la relación

$$I = \frac{\wp_{ef}^2}{\rho_0 c} \quad (1-11)$$

que, aplicada a la definición de nivel de intensidad nos da el nivel de presión. Es decir, para ondas planas o esféricas lejos de la fuente es indiferente hablar de nivel de intensidad o nivel de presión porque ambos coinciden.

Tanto el nivel de presión sonora como el nivel de intensidad dependen tanto de la fuente y de sus características (potencia, forma de emisión, distancia a la fuente) como de las características del medio en el que se propaga el sonido (p.ej, espacio abierto o local cerrado), mientras que el nivel de potencia sonora depende exclusivamente de las características de la fuente.

Además de los niveles acústicos se definen también las *ganancias acústicas*,

$$G_I = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \quad [\text{dB}] \quad (1-12a)$$

$$G_p = 20 \log \frac{\wp_2}{\wp_1} = 10 \log \frac{\wp_2^2}{\wp_1^2} \quad [\text{dB}] \quad (1-12b)$$

$$G_W = 10 \log \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} \quad [\text{dB}] \quad (1-12c)$$

que dan la diferencia entre el nivel inicial y el nivel final. Al duplicar la potencia o intensidad de una fuente se produce una ganancia de 3 dB, mientras que al duplicar la presión sonora se produce una ganancia de 6 dB.

1.3.2. Composición de niveles acústicos.

Cuando se tienen distintas fuentes acústicas, el nivel resultante no será la suma de niveles, debido al carácter logarítmico de la definición de nivel acústico, y en el caso más general ni siquiera el cuadrado de la amplitud de la onda de presión será la suma de los cuadrados de las amplitudes de cada una de ellas, sino que la superposición de las ondas dará algo de la forma

$$\wp^2 = (\wp_1 + \wp_2)^2 = \wp_1^2 + \wp_2^2 + 2\wp_1\wp_2$$

y por la misma razón, la intensidad resultante no será en general la suma de las intensidades debidas a las dos fuentes.

Afortunadamente si las ondas sonoras emitidas por las dos fuentes son incoherentes[†] entre sí (no guardan una relación de fase definida, lo que ocurre por ejemplo siempre que sean de distintas frecuencias), el promedio de $2\wp_1\wp_2$ se hace cero y se cumple para los promedios y para las amplitudes

$$\wp_{ef}^2 = (\wp_{1ef} + \wp_{2ef})^2 = \wp_{1ef}^2 + \wp_{2ef}^2$$

y por tanto, para ondas planas o esféricas lejos de la fuente, se cumple también

$$I = I_1 + I_2$$

De este modo, la resultante de la composición de dos niveles acústicos viene dada por la relación

$$L_I = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_{ref}} = 10 \log \left[\frac{I_1}{I_{ref}} + \frac{I_2}{I_{ref}} \right] = 10 \log \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right]$$

o, para n niveles,

$$10^{\frac{L}{10}} = \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}, \quad (1-13)$$

[†]Decimos en este caso que se trata de *ondas no correlacionadas* o *incoherentes* en contraposición a las *ondas correlacionadas* o *coherentes* que tendríamos en caso contrario.

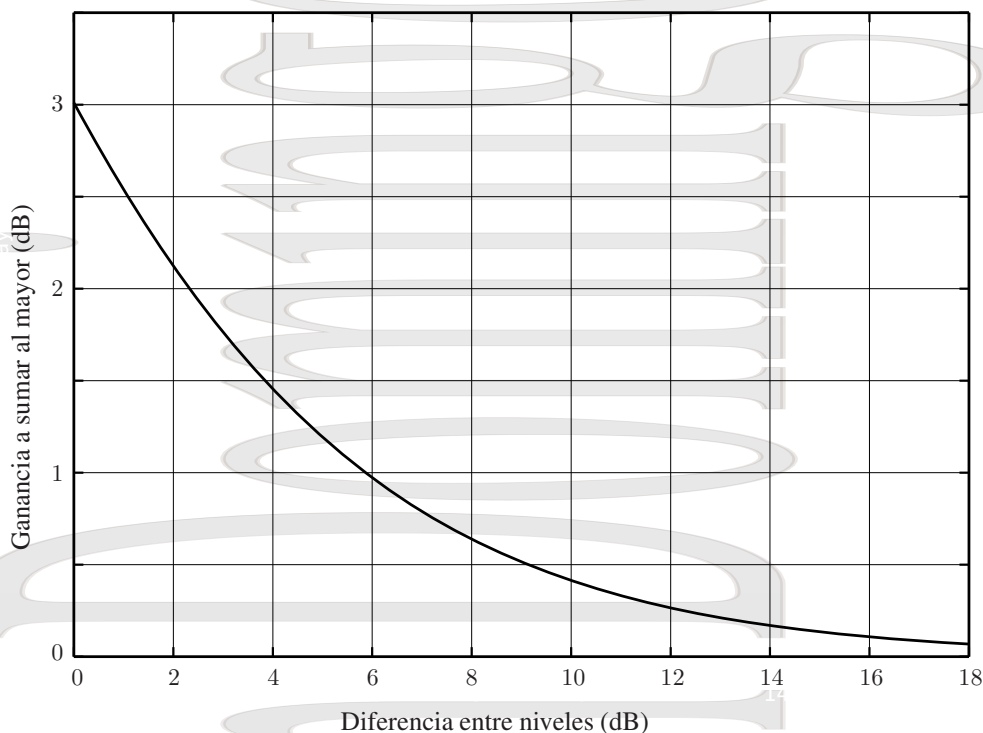


Figura 1-4: Diagrama para la suma gráfica de niveles acústicos.

que también permite despejar uno de los niveles a componer si se conocen los demás y el resultante.

Para dos niveles, la ganancia a sumar al mayor (supongamos $L_2 > L_1$) será

$$G = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_2} = 10 \log \left[\frac{I_1}{I_2} + 1 \right] = 10 \log \left[1 + 10^{-\frac{L_2 - L_1}{10}} \right],$$

que se representa gráficamente en la figura 1-4. Esto permite sumar dos niveles acústicos de forma gráfica con las siguientes consideraciones:

- Aunque con el diagrama mostrado el error sería de la mitad de la escala menor (que se podría mejorar haciendo más divisiones), al tener en cuenta el error de los instrumentos de medida en la práctica tendremos un error máximo en torno a $\pm 0,5$ dB.
- La suma de dos niveles iguales da una ganancia de 3 dB, que se suma a uno cualquiera de ellos.
- Si dos niveles difieren en 12 o más dB, la suma de ellos es prácticamente el mayor de los dos.
- Si hay que combinar varios niveles, se componen dos a dos y así sucesivamente con cada resultado.

Este procedimiento gráfico de suma ha sido muy utilizado históricamente, pero en la actualidad su importancia ha disminuido mucho debido al uso de las modernas calculadoras y ordenadores.

1.3.3. El efecto del ruido de fondo.

Entre los niveles acústicos a componer está incluido el debido al denominado *ruido de fondo*. Cuando el ruido de fondo es elevado, la medida de un nivel acústico superpuesto al mismo (que normalmente es también un nivel de ruido) resulta con frecuencia difícil de realizar.

El efecto que el ruido de fondo tiene sobre el nivel acústico real que se quiere medir depende de la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo. Antes de intentar aislar el nivel acústico debido a la fuente deseada es conveniente conocer el nivel de ruido de fondo.

Cuando la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo es mayor de 10 dB, el ruido de fondo puede ser despreciado. Si la diferencia entre ambos se encuentra entre 10 y 3 dB, puede utilizarse bien la gráfica anterior 1-4 o bien la expresión (1-13) para aislar la medida deseada del nivel acústico.

Si la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo es inferior a 3 dB, el ruido de la fuente es inferior al ruido de fondo y el valor que se obtiene no es en absoluto preciso, sino como mucho aproximado, los errores en las medidas afectan mucho al resultado.

1.4. Tipos de ruido y niveles de ruido.

El grado de molestia producido por un sonido no deseado, dependerá no solamente de la intensidad del mismo, sino también de su composición en frecuencias, continuidad, momento de emisión, contenido de información, origen del ruido e incluso en ocasiones de aspectos subjetivos como el estado mental y temperamental del receptor.

Los sonidos de origen natural suelen resultar más aceptables, mientras que el ruido más molesto suele ser el producido por elementos mecánicos. El nivel de molestia producido por ruidos en los que predominan las frecuencias altas es mayor que el nivel producido por los ruidos en los que predominan las frecuencias bajas.

Clasificaremos ahora distintos tipos de ruido según alguno de estos criterios.

1.4.1. Tipos de ruidos según intensidad y evolución temporal.

Ruido continuo o constante: El *ruido continuo* o *constante* es aquel ruido cuya intensidad permanece constante o presenta pequeñas fluctuaciones (menores a ± 5 dB) a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el producido por máquinas o motores que trabajan de forma continua.

Ruido fluctuante: El *ruido fluctuante* es aquel ruido cuya intensidad fluctúa a lo largo del tiempo en intervalos mayores que ± 5 dB. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias. Un ejemplo de ruido fluctuante sería el ruido del tráfico.

Ruido transitorio: El *ruido transitorio* tiene comienzo y final en un corto intervalo de tiempo, como ocurre con el paso de un vehículo.

Ruido de impacto: El *ruido de impacto* es aquel ruido cuya intensidad aumenta bruscamente durante un impulso. La duración de este impulso es breve, en comparación con el tiempo que transcurre entre un impulso y otro. Como ejemplos tendríamos un disparo o un golpe de martillo.

1.4.2. Tipos de ruidos según composición en frecuencias.

Ruido blanco: El *ruido blanco* consiste en una señal de banda ancha que contiene todas las frecuencias del espectro con distribución aleatoria de amplitud que da una densidad espectral independiente de la frecuencia. En la práctica, su rango a efectos de medidas experimentales va de los 20 Hz a los 20 kHz.

Si se representa la densidad de energía en función de bandas de octava en vez de linealmente frente a la frecuencia, se obtiene una recta ascendente de pendiente 3 dB/octava ya que en cada banda hay el doble de frecuencias que en la anterior. El nombre proviene de la luz blanca, que es una mezcla de todas las frecuencias.

El sonido producido por el agua corriente se ajusta bastante bien al ruido blanco. La imagen de un televisor analógico cuando no está sintonizado ningún canal también es ruido esencialmente blanco. El ruido blanco de baja intensidad puede favorecer la relajación y el sueño. El ruido blanco se utiliza para la calibración de la respuesta en frecuencia de equipamientos electrónicos que trabajan con sonido.

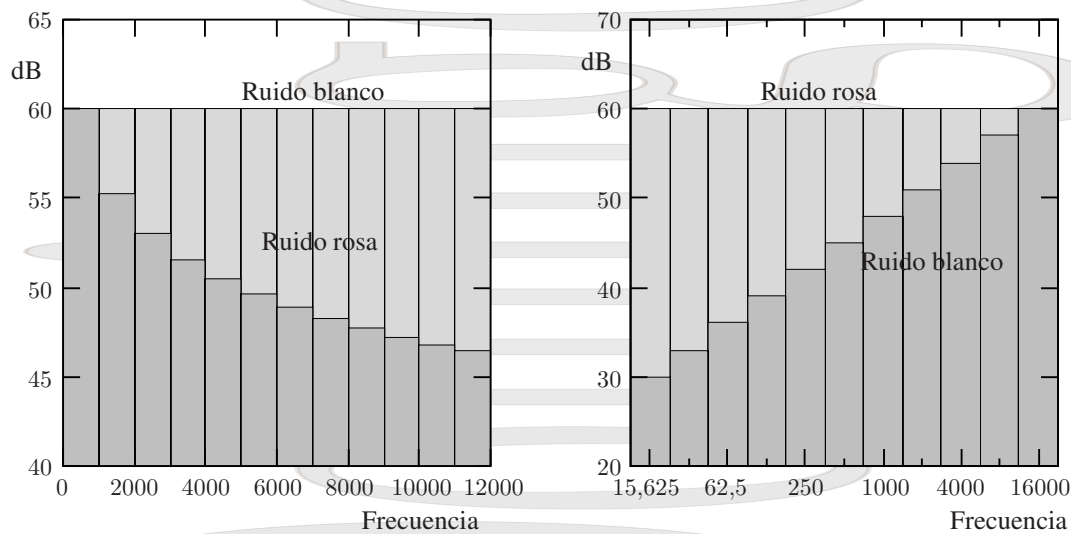


Figura 1-5: Ruido blanco y ruido rosa. En la figura se comparan el ruido blanco y el ruido rosa en una escala lineal de frecuencias y en una escala logarítmica en base 2 (es decir, en una escala de bandas de octava).

Ruido rosa: El *ruido rosa* o ruido $1/\nu$ es un ruido con una distribución de frecuencias tal que su densidad espectral de potencia es proporcional a la inversa de la frecuencia. Esto implica que su nivel, por bandas de tercio de octava, es constante. Por el contrario, el nivel del ruido rosa por intervalo fijo de frecuencias va decayendo a razón de 3 dB/octava, de forma no lineal aunque las frecuencias se representen en un eje lineal.

El nombre “ruido rosa” obedece a una analogía con la luz blanca (que es una mezcla de todos los colores) que, después de ser coloreada de forma que se atenúen las frecuencias más altas (los azules y violetas) resulta un predominio de las frecuencias bajas (los rojos). Así pues, el ruido rosa es ruido blanco coloreado de manera que es más pobre en frecuencias altas, esto es: en agudos. Mientras que el ruido blanco es más “silbante”, el ruido rosa es más “apagado”.

El espectro del ruido rosa es semejante al espectro medio acumulado de la música sinfónica o de instrumentos armónicos como el piano o el órgano. Asimismo se parece al ruido de funcionamiento de un dispositivo electrónico (el “*flicker noise*”), parecido también al que se percibe entre dos emisoras de FM, suena como un soplido.

Se utiliza para calibrar equipos que van a reproducir sonido y así analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido etc. Al ser una señal patrón conocida, al generarla a través de un altavoz es posible conocer datos sobre el comportamiento acústico del altavoz, la sala etc. . . y ecualizar salas, haciendo que todas las bandas se vean al mismo nivel en un micrófono de respuesta plana.

Ruido marrón: Su densidad espectral de energía es proporcional a $1/\nu^2$ y por tanto, tiene más energía a bajas frecuencias que el ruido rosa.

1.4.3. Índices de ruido.

El efecto fisiológico del ruido no sólo es función de su nivel, sino también de su duración y de su distribución en el tiempo. El carácter variable en el tiempo de la mayoría de los ruidos invita a definir índices que permiten asignar un valor representativo del efecto del ruido y de la respuesta del oído a dicha variación temporal.

Nivel continuo equivalente.

El *nivel continuo equivalente* (L_{eq}) se define como el nivel sonoro que debería tener un sonido que se mantuviera constante a lo largo del intervalo de tiempo considerado para que su energía acústica fuera la misma que la energía

acumulada del sonido fluctuante real en el intervalo de tiempo dado. Matemáticamente se expresa como el nivel eficaz del sonido en el intervalo de medida,

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} \right) dt \right] = 10 \log \left[\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_P(t)}{10}} dt \right]. \quad (1-14)$$

El conocimiento del L_{eq} es importante en el análisis de un ruido fluctuante como el del tráfico para la evaluación de la exposición ocupacional al ruido. El significado físico del nivel continuo equivalente es de nivel acústico del valor medio del ruido.

Nivel de exposición sonora.

Se define el *nivel de exposición sonora* (SEL) como el nivel que debería dar en un segundo un sonido constante de forma que tuviese la misma energía que el ruido considerado en el periodo de tiempo dado. Su expresión matemática es de la forma

$$SEL = 10 \log \left[\frac{1}{1 \text{ s}} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} \right) dt \right] = 10 \log \left[\frac{1}{1 \text{ s}} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_P(t)}{10}} dt \right]. \quad (1-15)$$

El SEL permite comparar dos ruidos transitorios. El significado físico del nivel continuo equivalente es de nivel acústico del ruido acumulado.

Niveles percentiles.

Los *niveles percentiles* L_N representan los valores del nivel sonoro de una cierta fuente fluctuante (ruido ambiental en general) que resultan superados durante el $N \%$ del tiempo total de la medida. En general, los más utilizados son los siguientes:

L_1 Nivel sonoro superado durante el 1 % del tiempo.

L_{10} Nivel sonoro superado durante el 10 % del tiempo.

L_{50} Nivel sonoro superado durante el 50 % del tiempo.

L_{90} Nivel sonoro superado durante el 90 % del tiempo.

L_{99} Nivel sonoro superado durante el 99 % del tiempo.

Los niveles L_1 y L_{99} suelen asimilarse a los valores máximo y mínimo, respectivamente, del nivel sonoro fluctuante considerado, mientras que el nivel L_{50} es el nivel medio o más probable.

Niveles sonoro promediado día/noche.

Se trata de un índice similar al L_{eq} , pero que intenta reflejar que los ruidos son más molestos durante los períodos de descanso nocturnos que durante el día. El intervalo de observación de 24 horas, se divide en dos subintervalos y se penaliza el período nocturno. La definición de estos intervalos día/noche varía dependiendo de la legislación local, quedando la definición en la forma

$$L_{dn} = 10 \log \frac{1}{24} \left[16 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (1-16)$$

donde L_d y L_n son los niveles sonoros promediados en el día y la noche respectivamente.

Niveles sonoro promediado día/tarde/noche.

Se trata de un índice similar al nivel día-noche, pero con una ponderación un poco más detallada. El intervalo de observación de 24 horas, se divide en tres subintervalos y se penalizan de forma decreciente el período nocturno y la tarde, en la forma

$$L_{dtn} = 10 \log \frac{1}{24} \left[12 \times 10^{L_d/10} + 4 \times 10^{\frac{L_t+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (1-17)$$

donde L_d , L_t y L_n son los niveles sonoros promediados en el día, la tarde y la noche respectivamente.

1.5. Fuentes sonoras.

1.5.1. Fuente omnidireccional.

Decimos que una fuente es omnidireccional si emite por igual en todas las direcciones. Para una fuente omnidireccional la propagación se realiza uniformemente en forma de ondas esféricas con la fuente como foco. Si las pérdidas de energía son despreciables y denominamos \dot{W} a la potencia de la fuente, la intensidad sonora I a una distancia r de la fuente es de la forma

$$I = \frac{\dot{W}}{4\pi r^2} \quad (1-18)$$

y, lejos de la fuente, está relacionada con la presión acústica eficaz en la forma

$$I = \frac{\dot{W}}{4\pi r^2} = \frac{\wp_{ef}^2}{\rho_0 c} \quad (1-19)$$

donde $\rho_0 c$ es la impedancia acústica específica del medio.

Podemos relacionar los niveles de potencia y presión para una onda esférica lejos de la fuente. Para ello partimos de

$$L_W = 10 \log \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{ref}} = 10 \log \frac{\wp_{ef}^2 S}{\dot{W}_{ref} \rho_0 c} = 10 \log \left\{ \frac{\wp_{ef}^2}{\wp_{ref}^2} \frac{\wp_{ref}^2 S}{\dot{W}_{ref} \rho_0 c} \right\},$$

que lleva a

$$L_W = L_P + 10 \log S + 10 \log \frac{\wp_{ref}^2}{\dot{W}_{ref} \rho_0 c}.$$

En condiciones atmosféricas normales,

$$\frac{\wp_{ref}^2}{\dot{W}_{ref} \rho_0 c} = \frac{(20 \mu\text{Pa})^2}{(10^{-12} \text{ W})(415 \text{ Pa s m}^{-1})}$$

que da $10 \log 0,96 = -0,17 \simeq 0$, despreciable frente al resto de los términos que aparecen. Expresando S como $4\pi r^2$ y desarrollando se obtiene la relación entre L_P y L_W

$$L_P = L_W - 20 \log r - 11. \quad (1-20)$$

Obsérvese que al duplicar la distancia del observador a la fuente el nivel de presión sonora decrece en 6 dB. Como en realidad el aire absorbe, sobre todo a altas frecuencias, la reducción real será algo mayor.

1.5.2. Fuente direccional.

En realidad todas las fuentes sonoras emiten con más intensidad en unas direcciones que en otras y por tanto son fuentes direccionales. Para describir su comportamiento se define el *coeficiente de directividad* de una fuente como la

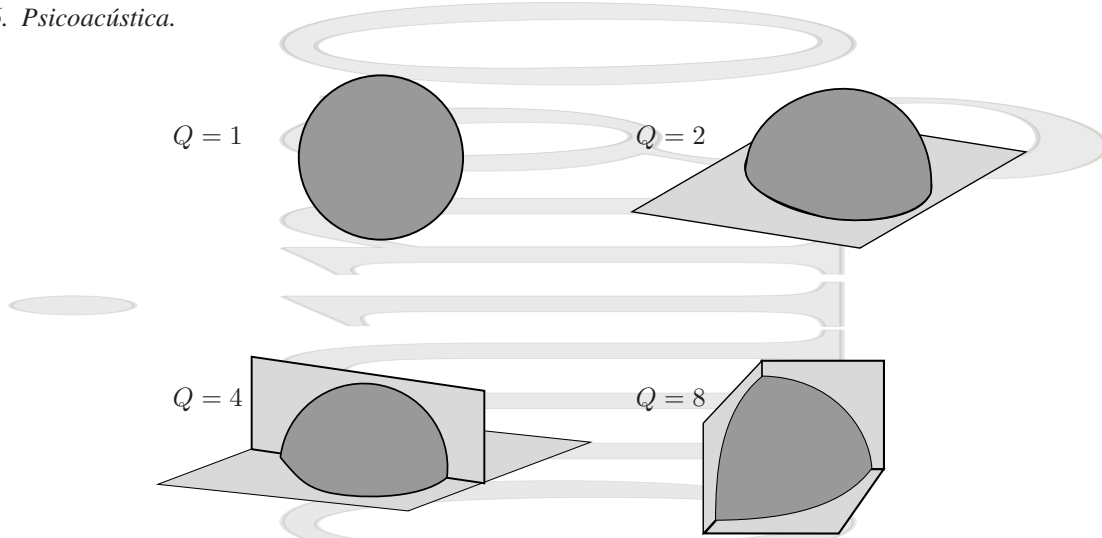


Figura 1-6: Algunos ejemplos de fuentes direccionales en las que la emisión es uniforme en determinados rangos de direcciones y nula en otros.

relación entre la intensidad acústica que se mide en un punto en una determinada dirección y la que habría si la fuente fuese omnidireccional y tuviese la misma potencia sonora,

$$Q(\theta, \phi) = \frac{I(\theta, \phi)}{I} = \frac{\varphi(\theta, \phi)^2}{\varphi^2} = 10^{\frac{L_P(\theta, \phi) - L_P}{10}} \quad (1-21)$$

donde L_P es el nivel de presión sonora en el punto de recepción si la emisión fuera esférica con la misma potencia de la fuente y $L_P(\theta, \phi)$ el que realmente hay.

El *índice de directividad* representa la directividad en dB y se define como

$$D(\theta, \phi) = 10 \log Q(\theta, \phi) = L_P(\theta, \phi) - L_P. \quad (1-22)$$

Los valores positivos de D corresponden a direcciones en la que se emite más que la media, mientras que los negativos a direcciones de menor intensidad.

Para una fuente direccional, la intensidad en un punto en una determinada dirección se expresa en la forma

$$I(\theta, \phi) = I Q(\theta, \phi) = \frac{\dot{W}}{S} Q(\theta, \phi) = \frac{\dot{W}}{4\pi r^2} Q(\theta, \phi) \quad (1-23)$$

y la ecuación (1-20) queda, para el nivel de presión $L_P(\theta, \phi)$ producido por una fuente direccional en una dirección de coeficiente de directividad $Q(\theta, \phi)$,

$$L_P(\theta, \phi) = L_W + 10 \log \frac{Q(\theta, \phi)}{4\pi r^2}, \quad (1-24)$$

en función del nivel de potencia total de la fuente L_W .

En la figura 1-6 se muestran algunos ejemplos de fuentes direccionales en las que la emisión es uniforme en determinados rangos de direcciones y nula en otros.

1.6. Psicoacústica.

Las características físicas de las ondas pueden expresarse mediante parámetros físicos como intensidad y frecuencia, que pueden medirse con una cierta precisión de forma objetiva mediante los instrumentos apropiados. Sin embargo, la respuesta del oído tiene un carácter más subjetivo, que habrá que relacionar con los parámetros físicos objetivos. Éste es precisamente el objeto de la *Psicoacústica*, rama de la Psicofísica que estudia la relación existente entre las

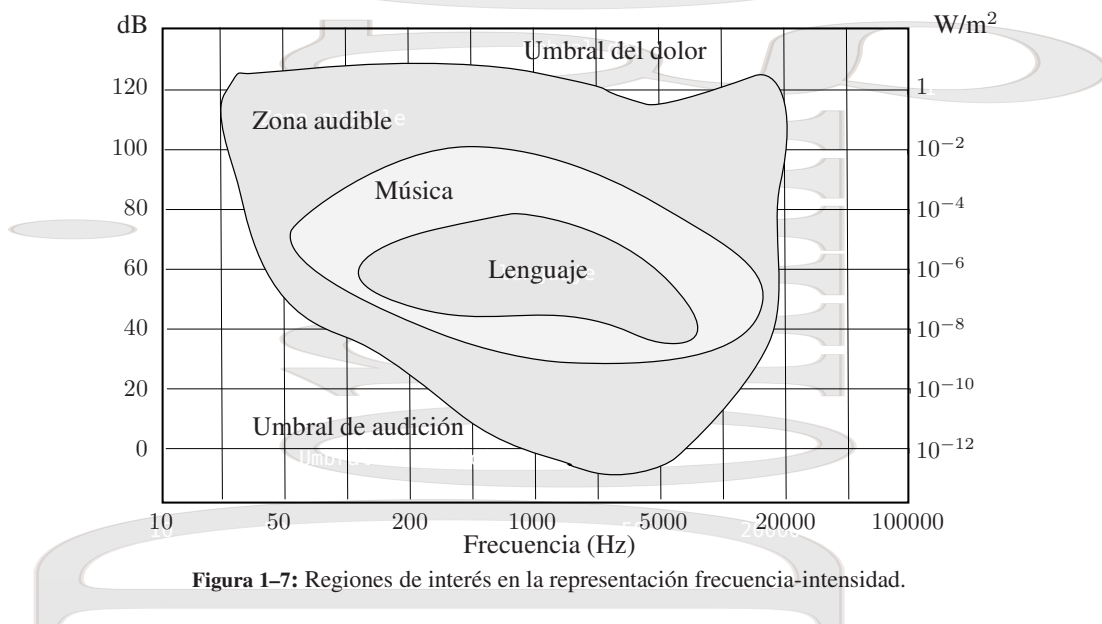


Figura 1-7: Regiones de interés en la representación frecuencia-intensidad.

características físicas de un estímulo sonoro, y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca en una persona.

La Psicoacústica es una disciplina esencialmente empírica. Sus conclusiones se obtienen a partir del análisis estadístico de los resultados de experimentos que buscan medir la respuesta subjetiva de distintas personas a estímulos de propiedades físicas cuantificadas.

Algunos de los objetivos principales de la psicoacústica son:

- Establecer un modelo de la relación existente entre la magnitud de la sensación producida por un estímulo y la magnitud física del mismo.
- Establecer los umbrales (absolutos) de sensación en cada parámetro, como frecuencia e intensidad.
- Establecer los umbrales diferenciales de percepción en cada parámetro del estímulo (mínima variación y mínima diferencia perceptibles).
- Estudiar la sensación sonora producida en respuesta a varios estímulos simultáneos.

Los experimentos que dan lugar a dichas predicciones, con las reservas que conlleva el hecho de la variabilidad de estímulos, escuchas, situaciones de entorno e incluso cualquier tipo de predisposición mental, permiten establecer relaciones de sensación sonora con intensidad y frecuencia. En la figura 1-7 se muestran las regiones de interés del intervalo acústico para varios usos, obtenidas mediante estos métodos de la Psicoacústica.

1.6.1. Sonoridad.

Denominamos *sonoridad* a la medida subjetiva de la intensidad con que el oído humano percibe un sonido. En particular, la intensidad con que el oído humano percibe el sonido no va en relación directa a la intensidad física del mismo, sino que depende además de otros factores como su frecuencia y anchura de banda. Por ejemplo, un sonido puro de 100 Hz y 50 dB parece menos sonoro que uno de 2 kHz y tan sólo 30 dB. Para representar la sonoridad se utilizan dos unidades, los fonios y los sonios.

1.6.2. Nivel de sonoridad: Escala de fonios y líneas isofónicas.

A la hora de representar la sonoridad en la escala de fonios, se toma como referencia un tono puro de 1000 Hz y se define en *nivel de sonoridad* o sonoridad en *fonios* de un sonido como el nivel de presión de un tono puro de 1000 Hz

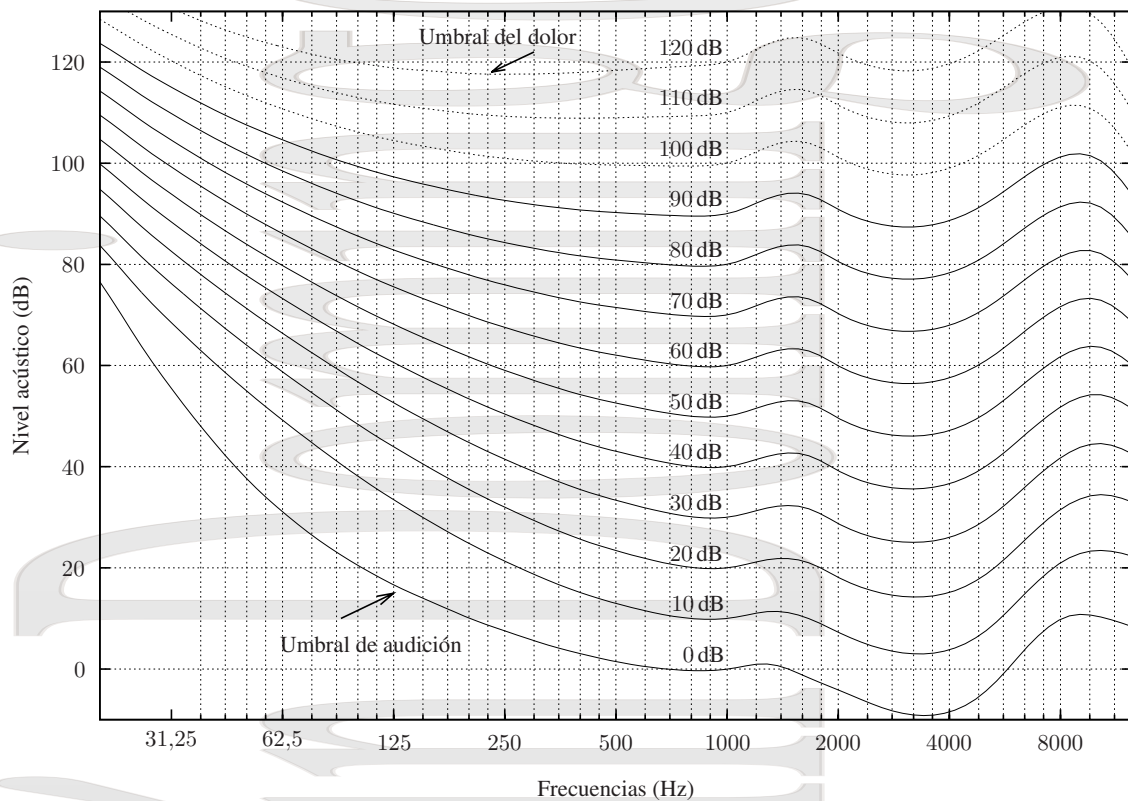


Figura 1-8: Diagrama de líneas isofónicas según la norma ISO-226:2003. Estas líneas están basadas en los trabajos de Robinson y Dadson (1956) que dieron lugar a la primera versión de la norma ISO-226, posteriormente revisada en 2003. Aunque estén creadas con la misma intención no deben confundirse con las isofónicas de Fletcher y Munson (1933) que tienen distinta forma. Por encima de 90 dB no hay datos experimentales fiables, por lo que las líneas que se muestran son una extensión del estudio, pero deben considerarse imprecisas.

que produce la misma sensación de intensidad sonora que el sonido considerado. A la vista de las definiciones de dB y fonio, podemos decir que el decibelio es una magnitud invariable desde el punto de vista físico, pero variable subjetivamente, mientras que el fonio es subjetivamente invariable, pero variable físicamente.

Las *líneas isofónicas* son curvas que unen valores del nivel de presión que tienen la misma sonoridad a distintas frecuencias. Todos los puntos sobre una línea isofónica tienen la misma sonoridad y por tanto los niveles asociados son percibidos con la misma intensidad subjetiva aunque sus niveles físicos de intensidad sean distintos. Así se pueden tener sensaciones sonoras similares (p.ej, 20 fonios) para distintos valores intensidad/frecuencia, por ejemplo para

125 Hz	1000 Hz	63 Hz
43,9 dB	20 dB	58,6 dB

Estas curvas permiten comparar la intensidad subjetiva de dos sonidos puros de diferentes frecuencias e intensidades.

Las primeras líneas isofónicas fueron obtenidas por Fletcher y Munson en el año 1933. Para su construcción, se basaron en la comparación entre dos tonos puros: un tono de 1 kHz e intensidad fija, utilizado como referencia, y un tono de otra frecuencia e intensidad variable, que los participantes en el experimento debían ajustar hasta que la sensación sonora de intensidad fuera igual que la del tono de 1 kHz. Representando gráficamente los resultados en función de la frecuencia, obtuvieron para cada intensidad de referencia (a 1 kHz) una curva o contorno de igual sonoridad. Como se ha utilizado como referencia el tono de 1 kHz, un tono de esta frecuencia y nivel acústico 10, 20, 30, ... dB causará una sonoridad de 10, 20, 30, ... fonios respectivamente.

Los contornos de igual sonoridad han sido determinados nuevamente con mayor precisión por Robinson y Dadson en 1956, y posteriormente normalizados por la Organización Internacional de Normalización como norma ISO 226.

Esta norma ha sido revisada en el año 2003[†] y las curvas revisadas se presentan en la figura 1–8 cada 10 dB. Si nos fijamos en la línea correspondiente al umbral de audición, vemos que los sonidos agudos y sobre todo los graves necesitan una mayor intensidad para ser percibidos, mientras que los de frecuencias medias se perciben a menor intensidad (donde la curva tiene mayor depresión). Así, al bajar el volumen los graves (y después los agudos) son lo primero que se pierde.

A medida que aumenta la intensidad, aunque las distintas curvas siguen manteniendo un cierto parecido con la correspondiente al valor umbral, poco a poco se van haciendo más planas. También se observa que para frecuencias inferiores a 500 Hz las líneas se concentran y que para frecuencias superiores 1 kHz adquieren formas complicadas, variando rápidamente en función de la frecuencia. Los menores valores de L_P requeridos en las proximidades de 3 kHz para producir una misma sensación de sonoridad se deben a la resonancia del canal auditivo en esa frecuencia.

Hay que hacer notar que estas curvas en realidad reflejan los promedios de un número considerable de personas jóvenes y con el oído en buenas condiciones, pudiendo existir variaciones individuales importantes. Asimismo, debe tenerse en cuenta que tanto las curvas de Fletcher y Munson como las de Robinson-Dadson son válidas para campo directo, ya que no tienen en cuenta que los sonidos no se perciben de la misma forma cuando provienen de distintas direcciones como ocurre con el campo reflejado.

1.6.3. Sonoridad: Escala de sonios.

El nivel de sonoridad en la escala de fonios es una magnitud psicoacústica, que en última instancia se basa en la comparación de sensaciones con las producidas por una frecuencia (1 kHz) que se toma arbitrariamente como referencia, de forma que puede asegurarse que la sensación sonora es la misma para un cierto nivel de sonoridad. Sin embargo, la relación entre sonidos de distinta intensidad no se corresponde con la relación entre sensaciones, ya que el valor del nivel de sonoridad se define en relación al del estímulo físico a una frecuencia de referencia, no a una valoración de la intensidad de la sensación. La sonoridad aparente de un sonido no es proporcional a su nivel en fonios. Por ejemplo, la sensación sonora correspondiente a un sonido de 80 fonios no es el doble de la correspondiente a uno de 40 fonios.

Para establecer una escala subjetiva de sonoridad que pueda tomarse como referencia se hace un estudio estadístico en el que participa un grupo de personas de oído normal, al que se le pide que asocien dos intensidades distintas de un sonido con la sensación de duplicación de la sensación sonora. Por ejemplo, se relaciona un sonido de una cierta frecuencia en audición monoaural y binaural (a la que se le supone una sensación sonora doble) con otro sonido de la misma frecuencia y distinta intensidad que, en audición monoaural, de la misma sensación sonora que el sonido anterior en audición binaural. Éste experimento se realiza utilizando varios niveles de presión sonora, para frecuencias en todo el rango de audibilidad y para una muestra suficiente de personas.

Experimentalmente se comprueba que un aumento de 10 fonios da lugar a una duplicación de la sensación sonora de forma que, por ejemplo, al pasar de 40 dB a 50 dB la sensación sonora se duplica.

Para representar la sensación sonora se utilizará la escala de *sonios*, en la que una duplicación en la sensación sonora está asociada a una duplicación del valor de la sonoridad en dicha escala. El sonio (o *son*) es una unidad de medida logarítmica y adimensional (similar al decibelio y, aun más, al fonio) que se usa para indicar la sonoridad con que se percibe un sonido dado. Se define como la sonoridad de un tono puro de 1 kHz que da un nivel de presión sonora de 40 dB. Así, 1 sonio corresponde a 40 fonios (y a 40 dB a 1 kHz), 2 sonios corresponden a 50 fonios, 4 a 60 fonios y así sucesivamente. Denominaremos *líneas isosónicas* (Véase la figura 1–9) a las líneas en las que la sensación sonora es la misma a distintas frecuencias como en las isofónicas, pero en la que el valor asociado está asociado de forma lineal con la sensación sonora.

La relación entre fonios y sonios viene dada por la expresión

$$S = 2^{(F-40)/10} \quad (1-25)$$

y se representa en la figura 1–10. A pesar de las ventajas de trabajar con fonios y sonios, independientes de la frecuencia, en la práctica se utilizan poco, salvo casos muy concretos, trabajándose habitualmente en dB ponderados.

[†] Las condiciones de medida son utilizadas para la obtención de la norma ISO-226 : 2003 son las siguientes: a) La onda incidente sobre el receptor puede considerarse plana. b) El emisor está situado frente al receptor. c) Las señales analizadas son tonos puros. d) El nivel acústico se mide donde estará el centro de la cabeza del receptor, antes de situarlo. e) La audición es binaural. f) Los sujetos son personas de audición normal en el rango de 18 a 25 años, ambos inclusive.

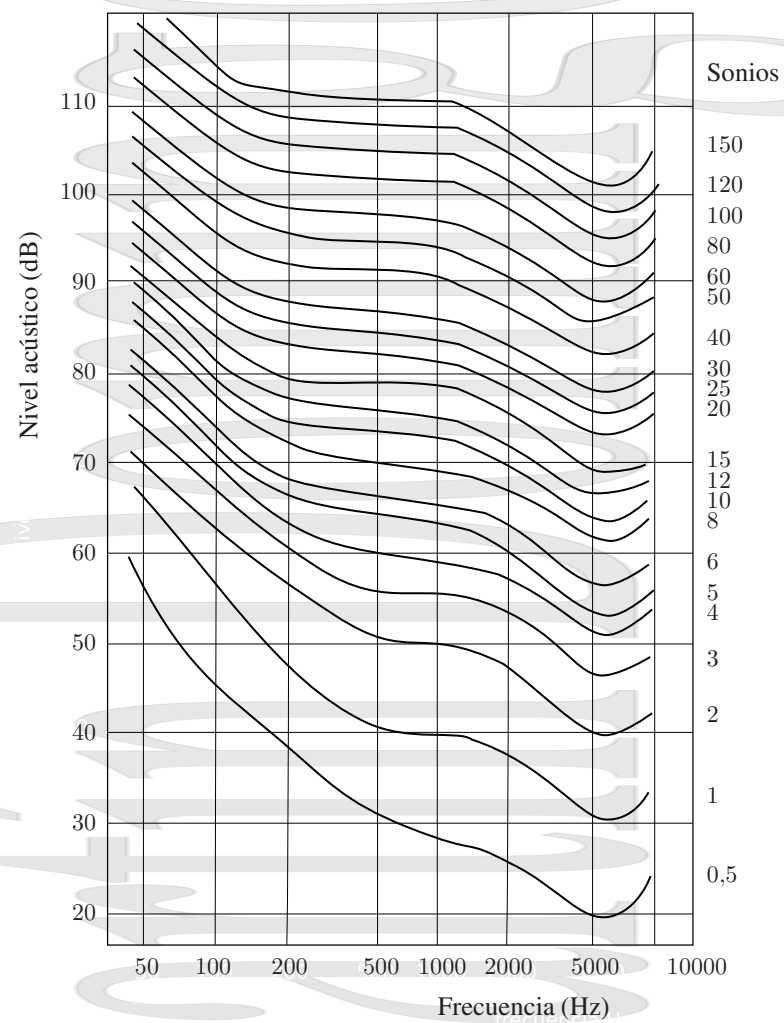


Figura 1-9: Gráfico de líneas isosónicas.

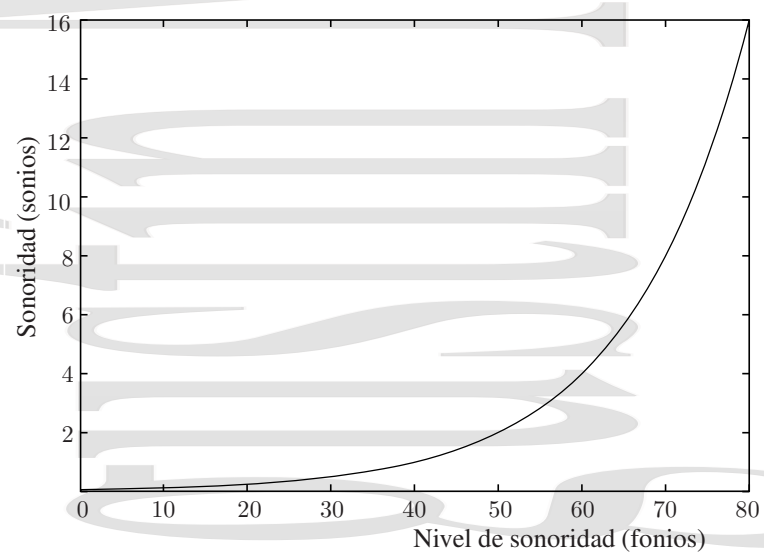


Figura 1-10: Relación entre sonios y fonios

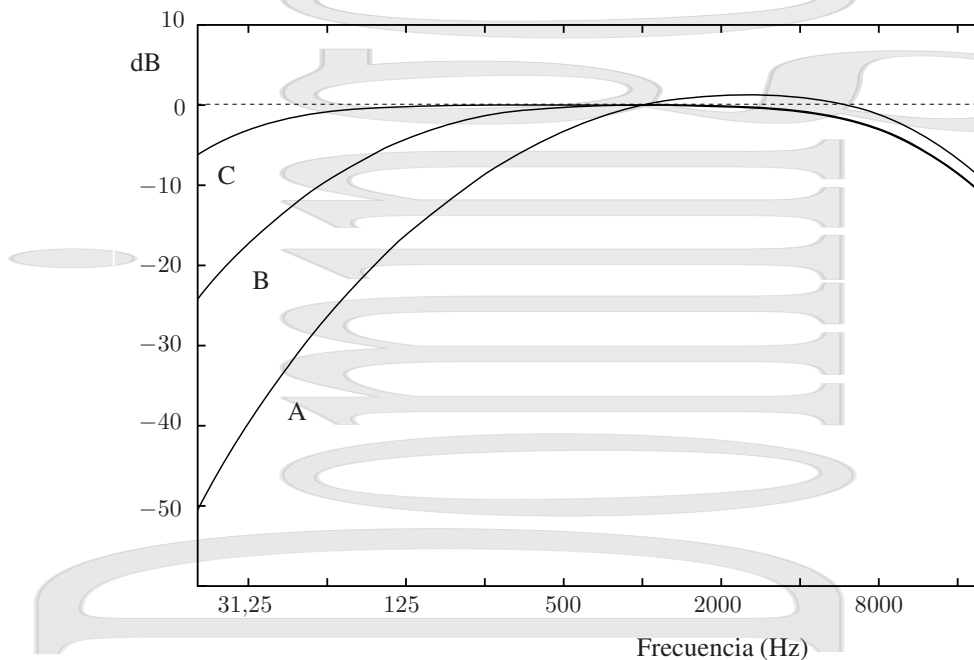


Figura 1-11: Curvas de ponderación A, B y C. Para cada frecuencia, el valor de la ordenada representa la corrección a aplicar al nivel de presión sonora de un tono puro de esa frecuencia para obtener su nivel sonoro ponderado según A, B o C respectivamente. Nótese que en 1 kHz todas las curvas coinciden en 0 dB, al ser esa la referencia de niveles de sonoridad.

1.6.4. Redes de ponderación.

Tras los trabajos de Fletcher y Munson quedó claro que el problema de la sensación sonora era más complejo de lo esperado, ya que la sensibilidad del oído depende de forma marcada de la frecuencia. Para tener en cuenta esto se intentó adaptar la instrumentación de medida de forma que pudiera obtenerse directamente la sensación sonora debida a un sonido cualquiera. Para ello se propuso intercalar un filtro de ponderación de frecuencias con una curva de respuesta en frecuencia inversa de las curvas de Fletcher y Munson. Como tanto para las altas como para las bajas frecuencias las isofónicas de Fletcher y Munson suben (dado que el oído requiere mayor nivel de presión sonora por su menor sensibilidad), este filtro debía imitar la respuesta del oído humano, acentuando las frecuencias en las que el oído es más sensible y atenuando aquéllas en las que es menos sensible; en este caso, atenuar las componentes de alta y baja frecuencia de forma que diera un valor más correlacionado con la sensación de sonoridad.

Esta idea tiene, en la práctica, varias dificultades. En primer lugar, no podemos hablar de una única línea isofónica de Fletcher y Munson, sino que hay una distinta para cada nivel de sonoridad. Esto implicaría que para una misma frecuencia serían necesarias distintas correcciones dependiendo del nivel sonoro. Esto dio lugar a que se propusieran tres curvas de ponderación distintas, la curva A, válida para niveles de sonoridad próximos a los 40 fonios (bajos niveles de presión sonora), la curva B, válida para niveles de sonoridad del orden de 70 fonios (niveles medios de presión sonora), y la curva C, destinada a los niveles de sonoridad cercanos a 100 fonios (niveles altos de presión sonora). En la figura 1-11 se muestran las tres curvas de ponderación utilizadas, y en la tabla 1-3 las correcciones necesarias para cada las bandas de tercio de octava. En algunos casos se utiliza una curva de ponderación D destinada a la medida del ruido de aviones.

Otra dificultad consiste en que las curvas isofónicas de Fletcher y Munson sólo son válidas para tonos puros, por lo cual el propósito original de obtener un valor único que se correlacionara con la sensación de sonoridad no pudo cumplirse. En efecto, la sonoridad subjetiva de dos sonidos de igual nivel con ponderación A, por ejemplo, pero de diferente composición espectral, puede ser muy desigual.

A pesar de ello, las cifras medidas utilizando la curva de ponderación A están bastante bien correlacionadas con el daño auditivo experimentado por las personas expuestas a ruidos intensos durante periodos considerables de tiempo, como suele ocurrir en los ambientes de trabajo en la industria. Asimismo se correlacionaba bastante bien con la sensación

Tabla 1–3: Valores de las correcciones de las curvas de ponderación A, B y C (Norma IEC 651/79) y D para la serie de frecuencias estándar de tercio de octava.

Frecuencia	Ponderación A	Ponderación B	Ponderación C	Ponderación D
10	–70,4	–38,2	–14,3	–26,5
12,5	–63,4	–33,2	–11,2	–24,5
16	–56,7	–28,5	–8,5	–22,5
20	–50,5	–24,2	–6,2	–20,5
25	–44,7	–20,4	–4,4	–18,5
31,5	–39,4	–17,1	–3,0	–16,5
40	–34,6	–14,2	–2,0	–14,5
50	–30,2	–11,6	–1,3	–12,5
63	–26,2	–9,3	–0,8	–11,0
80	–22,5	–7,4	–0,5	–9,0
100	–19,1	–5,6	–0,3	–7,5
125	–16,1	–4,2	–0,2	–6,0
160	–13,4	–3,0	–0,1	–4,5
200	–10,9	–2,0	0,0	–3,0
250	–8,6	–1,3	0,0	–2,0
315	–6,6	–0,8	0,0	–1,0
400	–4,8	–0,5	0,0	–0,5
500	–3,2	–0,3	0,0	0,0
630	–1,9	–0,1	0,0	0,0
800	–0,8	–0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0
1250	0,6	–0,0	0,0	2,0
1600	1,0	–0,0	–0,1	5,5
2000	1,2	–0,1	–0,2	8,0
2500	1,3	–0,2	–0,3	10,0
3150	1,2	–0,4	–0,5	11,0
4000	1,0	–0,7	–0,8	11,0
5000	0,5	–1,2	–1,3	11,0
6300	–0,1	–1,9	–2,0	10,0
8000	–1,1	–2,9	–3,0	8,5
10000	–2,5	–4,3	–4,4	6,0
12500	–4,3	–6,1	–6,2	3,0
16000	–6,6	–8,4	–8,5	–4,0
20000	–9,3	–11,1	–11,2	–7,5

de molestia y con la interferencia a la palabra causadas por determinados ruidos. Por estos motivos dicha curva se comenzó a utilizar de forma habitual, y se adoptó en numerosas normas y legislaciones.

Cuando el valor obtenido incluye la corrección a través de estas curvas de ponderación nos referimos a *nivel sonoro A*, *nivel sonoro B* y *nivel sonoro C*, y se expresan en dB(A), dB(B) y dB(C). Para obtener el nivel global ponderado se parte de la medida en dB físicos (sin ponderar) en cada banda de (o tercio de) octava, se corrige en cada una de ellas, y se compone el resultado de acuerdo con las expresiones correspondientes a composición de niveles.

En realidad la curva de ponderación B raramente se utiliza e incluso muchos instrumentos no la incluyen. Algunas especificaciones requieren la curva de ponderación C, por lo que suele estar presente en la instrumentación junto a la curva de ponderación A. El uso del nivel sonoro C permite, por comparación con el nivel sonoro A, determinar la importancia de las componentes de baja frecuencia. Como la curva A atenúa las bajas frecuencias y la curva C no, si las lecturas en dB(A) y dB(C) son similares, el contenido de baja frecuencia no es importante. Si, en cambio, la lectura en dB(C) es mayor que la lectura en dB(A), se debe a la presencia de bastante energía de baja frecuencia.

Es interesante mencionar que, a pesar que la curva de ponderación A estaba originalmente destinada a niveles de

sonoridad bajos, resulta también apropiada para describir fenómenos debidos a niveles elevados.

1.7. Enmascaramiento

La presencia de un sonido puro puede afectar la percepción de otro sonido puro. Así, el menos intenso puede resultar inaudible aunque su nivel de intensidad esté por encima del umbral de audición. Decimos en este caso que queda enmascarado por el otro sonido. Este efecto se nota más para frecuencias cercanas al sonido enmascarante.

El enmascaramiento tiene lugar como consecuencia de una modificación del umbral de audibilidad en la persona receptora y es debido a la forma en que la membrana basilar (responsable de la respuesta en frecuencia del oído humano) se excita ante la presencia de sonidos puros de distinta frecuencia.

Debido a esto, un sonido puro de baja frecuencia (grave) con suficiente nivel de presión sonora puede enmascarar a un tono de mayor frecuencia (agudo), tanto más cuanto mayor sea su nivel de presión sonora. Por el contrario, un tono agudo no puede enmascarar a uno grave, ya que la excitación de la membrana basilar no es simétrica, la onda estacionaria que se produce en el oído como consecuencia de una frecuencia alta no alcanza las zonas a las que llega la de baja frecuencia, mientras que la que se produce como consecuencia de un tono grave sí cubre la zona a la que llega la de alta frecuencia.

Éste fenómeno es más pronunciado cuando los dos sonidos tienen frecuencias próximas. Si los dos sonidos puros están suficientemente alejados en frecuencia, el nivel de intensidad sonora necesario ya no es tan alto, al producirse la resonancia en puntos diferentes de la membrana basilar.

Por ejemplo, se produce enmascaramiento, cuando dos personas están conversando y el sonido del tráfico impide que una escuche total o parcialmente lo que está diciendo la otra. También puede darse en un conjunto musical, cuando la dinámica de un instrumento (o la suma de varios) impide percibir los sonidos que está produciendo otro instrumento musical. Para que un solo (violín, voz) no sea enmascarado por la orquesta, éste debe diferir lo suficiente en frecuencias para que en el oído la resonancia se produzca en una zona de la membrana basilar que no está siendo excitada por la música de la orquesta.

Capítulo 2

Acústica de salas.

Índice

2.1. Introducción.	21
2.1.1. El coeficiente de absorción en acondicionamiento acústico.	22
2.1.2. Distintas contribuciones al campo acústico en un recinto.	22
2.2. Energía del campo reverberante.	23
2.2.1. El modelo de Sabine para la densidad de energía	23
2.2.2. El recorrido libre medio	28
2.3. El tiempo de reverberación.	29
2.3.1. La fórmula de Sabine para el tiempo de reverberación.	30
2.3.2. Otras expresiones para el tiempo de reverberación.	31
2.3.3. El tiempo de reverberación óptimo.	33
2.3.4. Otros parámetros de calidad acústica.	34
2.4. El campo acústico en un recinto	34
2.5. Reducción del nivel sonoro	36
2.6. Materiales acústicos y su disposición	37
2.6.1. Reflectores acústicos	38
2.6.2. Difusores acústicos	38
2.6.3. Materiales y sistemas absorbentes	39
2.6.4. Algunas normas genéricas de diseño.	44

2.1. Introducción.

En los estudios acústicos de los recintos se considerarán sonidos que se producen tanto dentro como fuera de los mismos. Normalmente no se desean los producidos fuera, por lo que será necesario aislar el recinto tanto acústicamente como frente a vibraciones. Lo mismo ocurre cuando se tienen sonidos no deseados producidos dentro del recinto, como el de maquinaria. En este caso es necesario que se absorba todo el sonido posible, de forma que apenas salga fuera y que en el recinto quede el mínimo posible.

Cuando los sonidos producidos en el interior del recinto son deseados, deben ajustarse las características del recinto para que la percepción del sonido sea lo mejor posible. Análisis estadísticos de psico-acústica nos dirán cómo es el sonido deseado, análisis físicos cómo tiene lugar la producción, propagación, reflexión y absorción y necesitaremos además un buen conocimiento de los materiales utilizados y de su comportamiento.

En el caso más general, un estudio acústico de un recinto incluirá tanto aislamiento de dentro a fuera como de fuera a dentro, junto con un acondicionamiento acústico del mismo. Estos requisitos deben optimizarse de forma combinada, de acuerdo con el uso del recinto y los condicionantes internos y externos.

Aunque lo ideal es diseñar cuidadosamente el recinto desde el principio, a menudo será necesario acondicionar un recinto inicialmente no optimizado acústicamente.

2.1.1. El coeficiente de absorción en acondicionamiento acústico.

Cuando una onda incide sobre una superficie, parte de la misma será reflejada, parte transmitida al otro lado del medio y parte absorbida en el medio y su energía disipada en forma de calor. Cuando se analiza el acondicionamiento acústico, se acostumbra a definir el *coeficiente de absorción* α de la superficie en la forma

$$\alpha = \frac{I_{abs}}{I_{inc}} = \frac{I_{noref}}{I_{inc}} = \frac{I_{inc} - I_{ref}}{I_{inc}} \quad (2-1)$$

donde la absorción no se define en función de la energía que realmente se absorbe en el material, sino de la que no vuelve al recinto que estamos acondicionando, es decir de toda la que no se refleja. Según esta definición, una superficie completamente reflectante tendría un coeficiente de absorción $\alpha = 0$, mientras que una superficie en la que no hay reflexión alguna tendría un coeficiente de absorción $\alpha = 1$. De este modo, una ventana abierta sería una superficie perfectamente absorbente, ya que no volvería nada del sonido que incide sobre ella, y por tanto $\alpha = 1$ para la misma.

La cantidad de energía que llega a través del material al recinto contiguo se caracteriza a través del *coeficiente de transmisión*, éste sí, definido en la forma habitual,

$$\tau = \frac{I_{trans}}{I_{inc}}. \quad (2-2)$$

Tanto α como τ dependen del material, del estado de la superficie, de la frecuencia y del ángulo de incidencia.

La mayor parte de los recintos reales tienen distintas superficies, cada una de ellas de materiales con distinta naturaleza y comportamiento acústico. Se define el *coeficiente de absorción promedio* en la forma

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} = \frac{\sum_i^n \alpha_i S_i}{S} \quad (2-3)$$

donde S_i y α_i son respectivamente el área y el coeficiente de absorción de la superficie i -ésima. Este coeficiente de absorción no es más que la media aritmética de los coeficientes de absorción de cada superficie ponderada al área de las mismas.

2.1.2. Distintas contribuciones al campo acústico en un recinto.

Cuando se tiene un recinto con superficies reflectoras del sonido, éste llegará al receptor de distintas formas, como se observa en la figura 2-1. La primera de las contribuciones de las que hablaremos es el *campo directo*, que corresponde

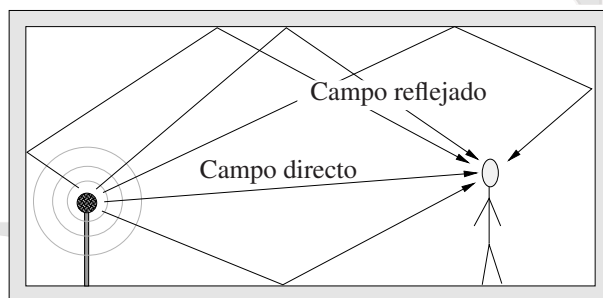


Figura 2-1: Distintas contribuciones al campo acústico en un recinto.

al sonido que llega directamente de la fuente al receptor sin que se produzca ninguna reflexión entre medias.

Antes de hablar de eco y reverberación y para entender la diferencia entre los mismos es conveniente referirnos a un aspecto particular de la forma en que el cerebro procesa los sonidos, la persistencia de la percepción de un sonido. En el cerebro humano, la persistencia de la sensación física producida por un sonido dado no llega más allá de unos 0,1 s. Si dos sonidos sucesivos tienen una separación menor que ese tiempo el cerebro los percibe como un sonido continuo

que se prolonga. Por el contrario, si esos dos sonidos sucesivos tienen una separación mayor que esos 0,1 s el cerebro los percibe como sonidos diferentes.

El *eco* es el fenómeno más sencillo que implica reflexión y consiste en una reflexión única que llega al receptor a partir de los 100 ms de emitido el sonido. Como la velocidad del sonido es del orden de 340 m/s, en este tiempo recorrerá al menos una distancia de 34 m, incluyendo la ida y la vuelta, por lo que para que haya eco la superficie más próxima debe estar al menos a 17 m. Cuando hay superficies “paralelas” a la distancia adecuada, la reflexión puede ir de una a otra produciéndose *eco múltiple*.

Cuando haya varias superficies al receptor llegará el sonido directo y el reflejado por las paredes. Las primeras reflexiones que se reciben se encuentran “bastante” separadas en el tiempo y reciben el nombre de *reflexiones tempranas*. La distribución temporal de estas reflexiones tempranas crea una sensación característica. Después de esas primeras reflexiones empiezan a aparecer las reflexiones de las reflexiones y las reflexiones de las anteriores y así sucesivamente, haciéndose las reflexiones asintóticamente más densas hasta que se alcanza el régimen estacionario si la fuente sonora emite de forma constante. Al campo acústico que llega después de sufrir alguna reflexión le denominamos *campo reflejado* o *campo reverberante*. Si la fuente deja súbitamente de emitir, estas reflexiones siguen produciéndose durante un tiempo, disminuyendo asintóticamente a cero. Denominamos *reverberación* a esta permanencia del sonido una vez apagada la fuente en la que las reflexiones van llegando en unos intervalos menores que esos 0,1 s.

Decimos que se tiene un *campo difuso* cuando la contribución predominante al campo acústico es la del campo reverberante. Decimos que el campo acústico es *perfectamente difuso* cuando la densidad de energía del campo es perfectamente homogénea y su propagación es perfectamente isotropa.

2.2. Energía del campo reverberante.

Cuando se activa o desactiva una fuente acústica en un recinto, la energía sonora dentro del mismo cambiará con el tiempo. En esta sección no consideraremos el efecto del *campo directo* y nos limitaremos al sonido que llega a un punto a través de una serie de reflexiones previas en las paredes del recinto, lo que hemos denominado *campo reflejado* o *campo reverberante*.[†]

Inicialmente, al activar la fuente, si se parte de una situación de energía nula la energía en el recinto no aumentará súbitamente, sino que las primeras ondas que llegarán serán las que hayan pasado por una única reflexión, después se les sumarán las que han pasado por dos reflexiones y así sucesivamente hasta que se alcanza un *régimen estacionario* en el que toda la energía suministrada por la fuente es absorbida por las paredes del recinto. Se denomina *periodo de establecimiento* al tiempo transcurrido entre que la fuente se activa y se alcanza el régimen estacionario. Como veremos más adelante, en realidad se tiende de forma asintótica al régimen estacionario y es necesario establecer un umbral.

Si, una vez alcanzado el régimen estacionario, se desactiva la fuente acústica, el sonido no dejará de llegar a un punto de forma brusca, sino que durante un tiempo seguirán llegando ondas que han pasado por diversas reflexiones en las paredes. Poco a poco, las ondas restantes se van absorbiendo en las paredes y cada vez llega menos sonido al punto hasta que apenas queda energía acústica en el recinto. Se denomina *periodo de extinción* al transcurrido entre que la fuente se desactiva y la energía sonora se extingue completamente. Como veremos, en realidad también se tiende de forma asintótica a la extinción.

2.2.1. El modelo de Sabine para la densidad de energía

Consideremos un modelo simple de la distribución de energía sonora en un recinto. En este modelo, debido a Sabine, se partirá de unas hipótesis restrictivas que darán lugar a unos resultados quizás demasiado simplistas, pero aceptables como una primera aproximación al problema. Básicamente consisten en lo siguiente,

- La densidad de energía sonora es la misma en todos los puntos del recinto, es decir, está distribuida homogéneamente. Esto obviamente no es cierto en las cercanías de las paredes del recinto, sobre todo si éstas no son

[†] Esto implica que el campo directo debe descontarse si queremos hacer cálculos únicamente del campo reverberante.

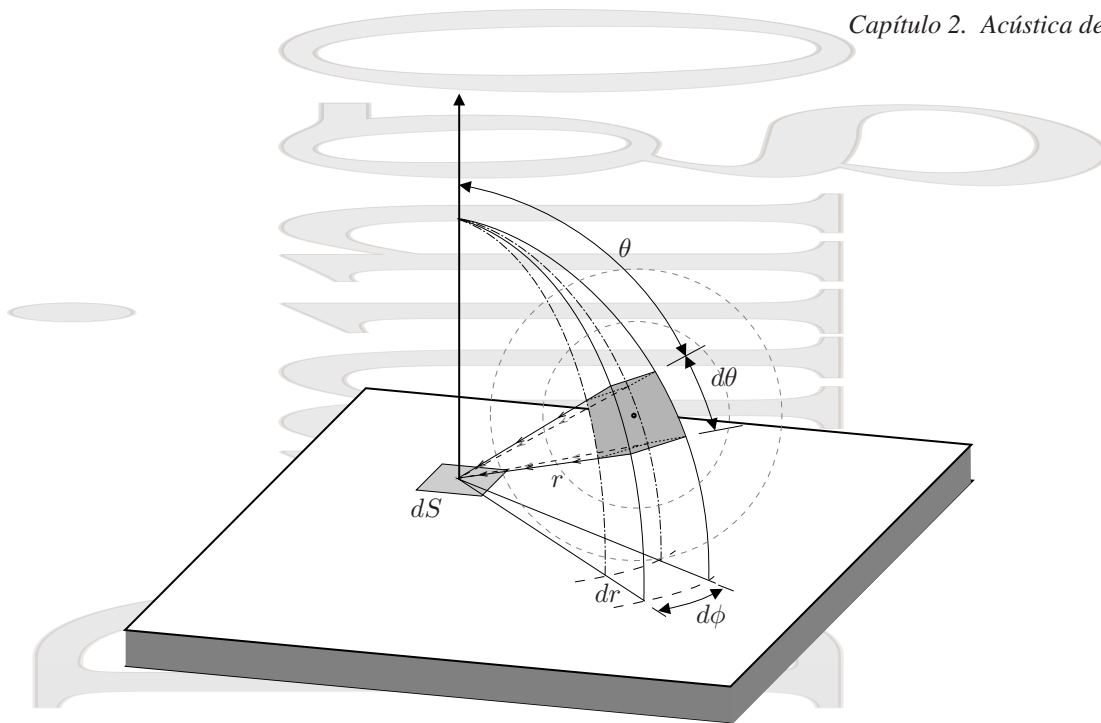


Figura 2–2: Modelo de Sabine para la distribución de energía acústica.

homogéneas o, a pesar de ser campo reverberante, entre distintos puntos más o menos alejados de la fuente, pero nos servirá para obtener esta primera aproximación.

Como hemos dicho, para que esta aproximación sea algo más adecuada, el coeficiente de absorción debe ser bastante uniforme en las paredes del recinto.

- La energía contenida en cualquier elemento de volumen se propaga por igual en todas las direcciones, es decir la energía se propaga de forma isotrópica desde cada punto, todas las direcciones de propagación desde un punto son igualmente probables.

En este modelo no se ha considerado la distribución de materiales absorbentes ni la forma del recinto, así como la posible presencia de modos normales de vibración, que pueden ser importantes a bajas frecuencias. Además se considera implícitamente que la potencia reverberante \dot{W}_{inc} suministrada por la fuente a la sala,[†] es constante cuando ésta está conectada.

Si consideramos el elemento de volumen dV de la figura, que en coordenadas esféricas puede representarse como $dV = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr$, la energía acústica contenida en el mismo vendrá dada por $\mathcal{E}dV$. Como esta energía se propaga por igual en todas las direcciones desde dV , la que ha pasado por dV será, a una distancia r , la misma para toda la superficie esférica $4\pi r^2$. Por tanto a dS llegará, procedente de dV , una energía

$$\frac{\mathcal{E}dV}{4\pi r^2} dS \cos \theta$$

donde $dS \cos \theta$ es la *superficie vista* de dS desde dV . Para obtener la energía que llega desde todo el hemisferio a la superficie dS será necesario integrar en las variables θ y ϕ ,

$$dE = \int_{\theta} \int_{\phi} \frac{\mathcal{E}r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr}{4\pi r^2} dS \cos \theta = \frac{\mathcal{E}dS dr}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{\mathcal{E}dS dr}{4}$$

Esta energía se propagará desde dV hacia la superficie dS con una velocidad $c = dr/dt$, por lo que la ecuación anterior puede escribirse como

$$\frac{1}{dS} \frac{dE}{dt} = \frac{\mathcal{E}c}{4} \quad (2-4)$$

[†] Nótese que esta potencia es la potencia que se comunica a la sala considerada como un sistema termodinámico, no la que suministra la fuente.

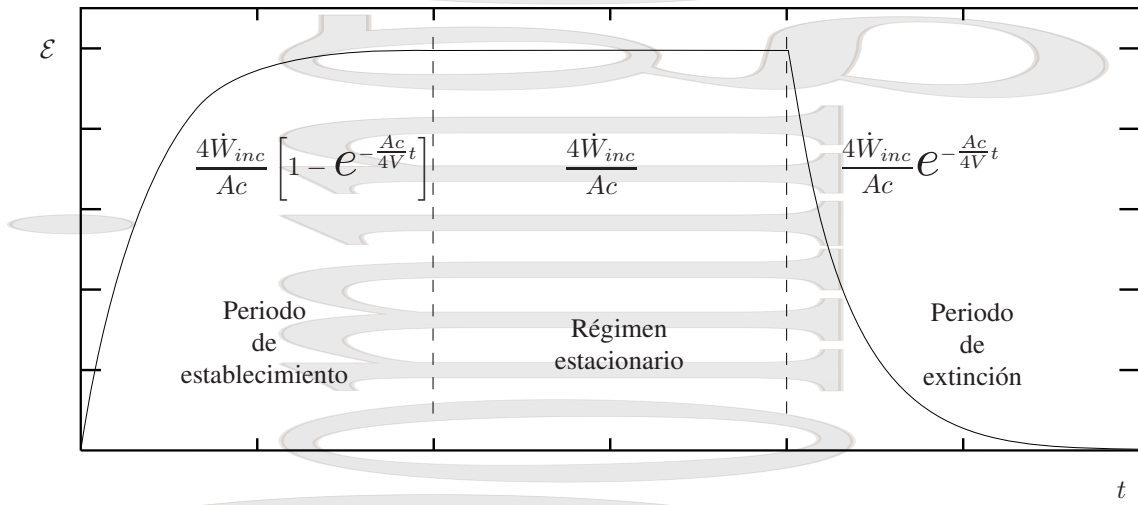


Figura 2-3: Evolución temporal de la densidad de energía sonora obtenida mediante el modelo de Sabine para el periodo de establecimiento, el régimen estacionario y el periodo de extinción. Los tiempos que se presentan en las distintas ecuaciones están contados desde el inicio de cada periodo.

que representa la energía incidente por unidad de tiempo y superficie sobre la pared. Como una fracción α de esta energía se absorberá, la energía absorbida por unidad de tiempo en toda la pared será

$$\frac{\mathcal{E}c}{4}\alpha S = \frac{Ac}{4}\mathcal{E} \quad (2-5)$$

donde $A = S\alpha$ es la denominada *absorción sonora de Sabine* del recinto. En esta definición consideramos que la absorción de las paredes del recinto es uniforme.

La energía reverberante suministrada por la fuente a la sala se empleará bien en aumentar la densidad de energía en el recinto o bien será posteriormente absorbida por las paredes en alguna de las reflexiones. Si lo expresamos por unidad de tiempo, se tiene la ecuación dinámica de la energía en este sistema,

$$\dot{W}_{inc} = V \frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{Ac}{4}\mathcal{E} \quad (2-6)$$

Las soluciones para la densidad de energía.

Por simplicidad comenzaremos analizando la ecuación (2-6) una vez se ha alcanzado el *régimen estacionario*. En este caso, $d\mathcal{E}/dt = 0$, por lo que se obtiene

$$\mathcal{E}_0 = \frac{4\dot{W}_{inc}}{Ac} \quad (2-7)$$

constante, por supuesto si \dot{W} es constante como es en el caso que analizamos.

La siguiente situación que analizaremos es la que se produce cuando la fuente deja de emitir, es decir en el *periodo de extinción*. En este caso, $\dot{W}_{inc} = 0$ y la ecuación (2-6) queda

$$V \frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{Ac}{4}\mathcal{E} = 0. \quad (2-8)$$

Si pasamos dt al otro miembro e integramos, queda una solución de la forma

$$\mathcal{E}(t) = cte e^{-\frac{Ac}{4V}t}, \quad (2-9)$$

y si tenemos en cuenta que para $t = 0$ la solución debe tener el valor correspondiente al régimen estacionario,

$$\mathcal{E}(0) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{Ac} \quad (2-7)$$

se llega inmediatamente a que $\mathcal{E}_0 = cte$ y por tanto,

$$\mathcal{E}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{Ac} e^{-\frac{Ac}{4V}t} \quad (2-10)$$

es la solución que nos da la evolución de la densidad de energía en el periodo de extinción. En ésta expresión,

$$\tau_e = \frac{4V}{Ac} \quad (2-11)$$

es la *constante de tiempo* que gobierna el decrecimiento (y el crecimiento en el periodo de establecimiento que veremos a continuación) de la densidad de energía acústica en el recinto. Nótese que en la ecuación (2-10) el tiempo está medido desde el inicio del periodo de extinción, no desde el inicio del periodo de establecimiento.

Analicemos finalmente el *periodo de establecimiento*. Hasta que se alcanza el régimen estacionario, la densidad de energía \mathcal{E} variará entre un valor inicial 0 y el valor (2-7) correspondiente al régimen estacionario de acuerdo con la ecuación (2-6) completa. Ésta es una ecuación diferencial de primer orden, por lo que su solución general dependerá de un único parámetro a ajustar de acuerdo con las condiciones iniciales. Como es una ecuación inhomogénea, su solución general será la suma de la solución general de la homogénea (2-9) y una solución particular de la ecuación completa, por ejemplo, (2-7), quedando

$$\mathcal{E}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{Ac} + cte e^{-\frac{Ac}{4V}t}.$$

Para $t = 0$ debe cumplirse $\mathcal{E}(0) = 0$, por lo que la constante debe ser $-\mathcal{E}_0$, y la solución de (2-6) para este caso queda en la forma

$$\mathcal{E}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{Ac} \left[1 - e^{-\frac{Ac}{4V}t} \right] \quad (2-12)$$

Evolución temporal de la presión efectiva.

Si suponemos que en cualquier punto del recinto, la energía llega a través de ondas individuales, y estas tienen entre sí relaciones de fase aleatorias (es decir son ondas no correlacionadas), la densidad de energía \mathcal{E} resultante será la superposición de las densidades de energía de las ondas individuales. Para ondas planas o suficientemente alejadas del foco, existe una relación entre la amplitud de presión efectiva y la densidad de energía asociada a cada onda individual,

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\wp_{ef1}^2}{\rho_0 c^2}$$

de forma que podemos escribir una relación para la densidad de energía resultante $\mathcal{E} = \sum_i \mathcal{E}_i$,

$$\mathcal{E} = \frac{\wp_{ef}^2}{\rho_0 c^2} \quad (2-13)$$

donde $\wp_{ef} = \sqrt{\sum_i \wp_{efi}^2}$ es la amplitud de la presión efectiva del campo acústico reverberante.

Como conocemos la variación temporal de la densidad de energía, podemos obtener la variación temporal de la amplitud de presión efectiva en cada uno de los casos anteriores,

Periodo de establecimiento

$$\wp_{ef}^2(t) = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A} \left[1 - e^{-\frac{Ac}{4V}t} \right] \quad (2-14a)$$

Régimen estacionario

$$\wp_{ef}^2 = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A} \quad (2-14b)$$

Periodo de extinción

$$\wp_{ef}^2(t) = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A} e^{-\frac{Ac}{4V}t} \quad (2-14c)$$

La intensidad equivalente del campo reverberante.

Una de las hipótesis que hemos utilizado para el modelo de Sabine es la de isotropía en la propagación de la energía, es decir en un punto la energía se propagaría por igual en todas las direcciones y ello implica que también en todos los sentidos. Ello implica que a través de cualquier superficie plana en un punto no hay un flujo neto de energía y por tanto no sería correcto hablar de intensidad neta.

Podríamos hablar de la energía que atraviesa la superficie en un sentido por unidad de superficie y de tiempo (y que se cancelaría por la que llega del otro lado). Se obtendría directamente a partir de la ecuación (2-4) que da la energía que llega a la superficie por unidad de tiempo y de superficie, sustituyendo \mathcal{E} por su valor en cada caso. Por ejemplo, para el régimen estacionario se obtendría directamente $I_{inc} = \dot{W}_{inc}/A$ utilizando el valor dado en (2-7).

Sin embargo no es la anterior la definición más interesante, sino la de una intensidad ficticia que satisfaga la relación

$$I_{eq} = \mathcal{E}c = \frac{\wp_{ef}^2}{\rho_0 c} \quad (2-15)$$

por analogía al caso de las ondas planas o en general, al de las ondas lejos de su origen. Ésta es la intensidad a la que denominaremos *intensidad equivalente del campo reverberante*, que representaría la intensidad de una onda plana que produzca la misma amplitud efectiva de presión en un punto que el campo considerado. Utilizando el modelo de Sabine su forma, para los distintos casos será

Periodo de establecimiento

$$I_{eq}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A} \left[1 - e^{-\frac{Ac}{4V}t} \right] \quad (2-16a)$$

Régimen estacionario

$$I_{eq} = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A} \quad (2-16b)$$

Periodo de extinción

$$I_{eq}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A} e^{-\frac{Ac}{4V}t} \quad (2-16c)$$

Trabajando con esta intensidad equivalente se cumplirá que el nivel de intensidad y el de presión son siempre el mismo, siempre que el campo directo se mida suficientemente lejos de la fuente.

El efecto de la absorción del medio

En las expresiones anteriores no hemos tenido en cuenta el efecto de la absorción del medio. Ésta hará la densidad de energía alcanzada en el régimen estacionario sea menor, que aumente más lentamente en el periodo de establecimiento y que en el periodo de extinción la energía decaiga más rápidamente que lo haría sin esa absorción. Para una onda plana que únicamente experimentara absorción en el aire la amplitud eficaz de la presión disminuiría de acuerdo con la expresión

$$\wp = \wp_0 e^{-a_p c t} \Rightarrow \wp^2 = \wp_0^2 e^{-2a_p c t} = \wp_0^2 e^{-a_I c t} \quad (2-17)$$

donde a_P es el *coeficiente de absorción del medio* [Neper/m] y $a_I = 2a_P$ (que representa el coeficiente de absorción del medio para el cuadrado de la amplitud eficaz de presión o para la intensidad) el parámetro que se utiliza habitualmente en acústica arquitectónica. Para valores de la humedad relativa f entre el 20 y el 70 % y frecuencias ν entre 1,5 y 10 kHz para la mayor parte de las aplicaciones prácticas de acústica de salas se utiliza la aproximación

$$a_I = 5,5 \times 10^{-4} \times \frac{50}{f} \left(\frac{\nu}{1000} \right)^{1,7}. \quad (2-18)$$

La forma de las expresiones de la presión eficaz en los distintos casos queda como

Periodo de establecimiento

$$p_{ef}^2(t) = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} \left[1 - e^{-\left(\frac{Ac}{4V} + a_I c\right)t} \right] \quad (2-19a)$$

Régimen estacionario

$$p_{ef}^2 = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} \quad (2-19b)$$

Periodo de extinción

$$p_{ef}^2(t) = \frac{4\rho_0 c \dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} e^{-\left(\frac{Ac}{4V} + a_I c\right)t} \quad (2-19c)$$

siendo la intensidad equivalente

Periodo de establecimiento

$$I_{eq}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} \left[1 - e^{-\left(\frac{Ac}{4V} + a_I c\right)t} \right] \quad (2-20a)$$

Régimen estacionario

$$I_{eq} = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} \quad (2-20b)$$

Periodo de extinción

$$I_{eq}(t) = \frac{4\dot{W}_{inc}}{A + 4a_I V} e^{-\left(\frac{Ac}{4V} + a_I c\right)t} \quad (2-20c)$$

2.2.2. El recorrido libre medio

Consideremos un recinto rectangular de dimensiones L_x , L_y y L_z y el campo acústico como un conjunto de rayos uniformemente distribuidos en las distintas direcciones de propagación posibles. De entre esos rayos consideremos uno genérico que forma un ángulo θ con el eje z y cuya dirección queda determinada además por un ángulo ϕ como se muestra en la parte izquierda de la figura 2-4. Para analizar las distintas reflexiones sobre las caras perpendiculares al eje z , podríamos ver el comportamiento del rayo que se representa en gris en la parte derecha de la figura. Cada vez que este rayo atraviesa una réplica de la superficie z el rayo real sufre una reflexión. Así, en un tiempo t , el rayo considerado habrá recorrido una distancia ct , con una componente z dada por $ct \cos \theta$ y se producirá una reflexión cada vez que esta última aumenta en L_z . Si denominamos N_z al número (fraccional) de reflexiones sobre las caras z en ese tiempo t y consideramos el rayo cuando sale de la superficie z inferior, debe cumplirse

$$N_z = \frac{ct |\cos \theta|}{L_z}$$

donde hemos utilizado $|\cos \theta|$ para tener en cuenta correctamente los ángulos $\theta > \pi/2$. De esta forma el número de reflexiones (cruces) por segundo sobre las caras perpendiculares al eje z es

$$n_z = \frac{dN_z}{dt} = \frac{c |\cos \theta|}{L_z}$$

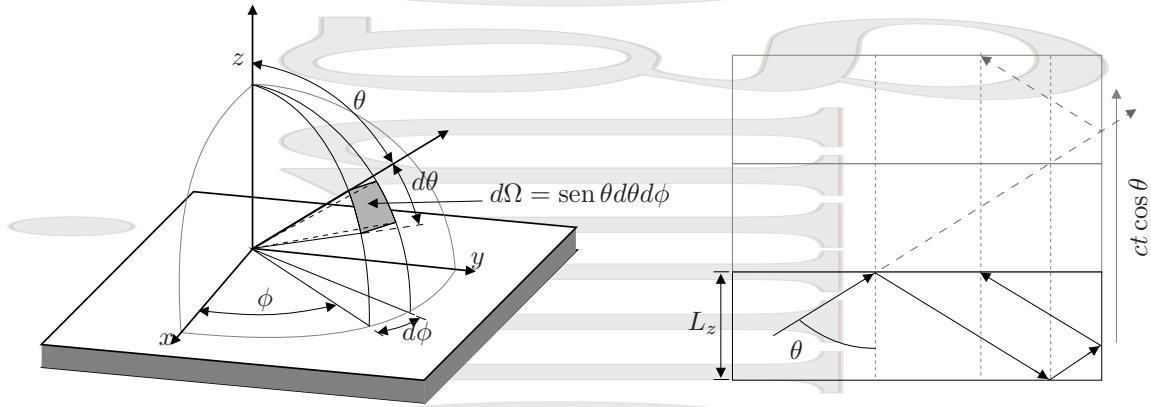


Figura 2-4: Cálculo del recorrido libre medio. Analizaremos las reflexiones de una onda genérica contra las caras perpendiculares al eje z .

para el rayo considerado. Si promediamos espacialmente este valor a todas las posibles direcciones a través del ángulo sólido $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ (4π estereorradianes para toda la esfera), se tiene

$$\langle n_z \rangle = \frac{c}{L_z} \frac{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi |\cos \theta| \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin \theta d\theta} = \frac{c}{L_z} \frac{2\pi \times 2 \int_0^{\pi/2} |\cos \theta| \sin \theta d\theta}{4\pi} = \frac{c}{2L_z}$$

mientras que para las caras perpendiculares a los ejes x e y queda

$$\langle n_x \rangle = \frac{c}{2L_x} \quad \langle n_y \rangle = \frac{c}{2L_y},$$

de forma que el número total de reflexiones por segundo, promediada a todas las posibles direcciones de los rayos es

$$\langle n \rangle = \langle n_x \rangle + \langle n_y \rangle + \langle n_z \rangle = \frac{c}{2} \left(\frac{1}{L_x} + \frac{1}{L_y} + \frac{1}{L_z} \right) = \frac{cS}{4V}, \quad (2-21)$$

donde $S = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$ es la superficie total del recinto y $V = L_x L_y L_z$ su volumen.

En realidad lo que hemos obtenido es el tiempo entre reflexiones promediado a todas las posibles direcciones, no el promediado temporalmente. Sin embargo, si hay suficiente reflexión no especular, como ocurre en la realidad, ambos valores esencialmente coincidirán, $\langle n \rangle = \bar{n}$. El *recorrido libre medio*, que representa la distancia promedio que recorre un rayo entre reflexiones consecutivas, vendrá dado por

$$\bar{\ell} = \frac{c}{\bar{n}} = \frac{4V}{S} \quad (2-22)$$

2.3. El tiempo de reverberación.

Consideremos ahora que ocurre con cada onda; en cada reflexión, una parte del sonido se absorbe por la superficie y otra parte es reflejada. Recordemos que incluimos dentro de la absorción todo aquello que no se refleja, por lo que dentro de la parte absorbida tendremos energía disipada en forma de calor en el material de la pared y energía transmitida a través de la pared, que se propaga a un recinto vecino. La parte reflejada seguirá propagándose hasta encontrarse con otra superficie, en la cual de nuevo se absorberá una parte y otra parte se reflejará. El proceso continúa sucesivamente hasta que la mayor parte de la energía de la onda sonora se haya absorbido, y el sonido que quede sea ya demasiado débil para ser percibido.

Cuando la fuente está conectada, esta disipación de energía se compensa por la nueva energía aportada por la fuente, pero en el momento en que ésta se desconecta, las ondas que permanecen propagándose en el recinto irán disminuyendo de intensidad por absorción hasta extinguirse, aunque esto no ocurrirá de forma instantánea. Se denomina *reverberación* a esta permanencia del sonido después de que se ha desconectado la fuente.

Para caracterizar la rapidez de este proceso se introduce el *tiempo de reverberación* T_{60} . Éste se define como el tiempo que tarda la señal acústica en disminuir a una millonésima parte de su valor inicial. De acuerdo con la definición de los niveles acústicos de presión o intensidad, esto se producirá cuando el nivel acústico disminuya en 60 dB desde su valor inicial. Por este motivo también se le denomina con la notación T_{60} . Como la absorción sonora depende de la frecuencia, el tiempo de reverberación también dependerá de la frecuencia.

A menudo (y especialmente a bajas frecuencias) es difícil medir el tiempo de reverberación a lo largo de los 60 dB de atenuación, ya que el ruido de fondo lo enmascara. En estos casos se representa la atenuación a lo largo de 20 o 30 dB y se extrapola el resultado para 60 dB.

El tiempo de reverberación dependerá de cómo sean de absorbentes las superficies del recinto. Por ejemplo, para paredes muy reflectantes (y por tanto poco absorbentes) serán necesarias muchas reflexiones hasta que el sonido se extinga y por tanto, el tiempo de reverberación T_{60} será grande. Si por el contrario, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta de la energía sonora y por tanto, el sonido se hará prácticamente inaudible en unas pocas reflexiones, de forma que el tiempo de reverberación T_{60} será pequeño.

Materiales como el vidrio, el hormigón o los azulejos son poco absorbentes del sonido, por lo que un recinto con paredes de estos materiales tendrá un tiempo de reverberación largo. Por el contrario, un recinto con abundancia de materiales altamente absorbentes como corcho, alfombras o cortinas pesadas tendrá un tiempo de reverberación corto.

El tiempo de reverberación es el parámetro más adecuado para caracterizar la “bondad” de las propiedades acústicas de un recinto; por ejemplo para salas de música es deseable un tiempo de reverberación alto (1,8 – 2 s) mientras que para que la inteligibilidad de la palabra sea mejor son convenientes tiempos de reverberación más bajos (0,4 – 0,6 s). A menudo se utiliza el tiempo de reverberación en las bandas de octava de 500 o 1000 Hz como parámetro para caracterizar las propiedades acústicas de un recinto.

El valor “óptimo” del tiempo de reverberación dependerá del volumen del recinto y del uso que se quiere dar al mismo. Además de distintos gráficos y tablas con valores sugeridos se utilizan algunas expresiones empíricas como la de Stephens y Bate[6]

$$T_{60} = K[0,0118V^{1/3} + 0,1070]$$

para una frecuencia de 500 Hz, donde V es el volumen del recinto (m^3) y K es un coeficiente que depende del tipo de sonido que se desea tener en el recinto. Sus valores típicos son de $K = 4$ para una sala de conferencias, de $K = 5$ para música orquestal y de $K = 6$ para coros y música de órgano.

2.3.1. La fórmula de Sabine para el tiempo de reverberación.

Intentemos obtener una relación entre el tiempo de reverberación y los materiales y dimensiones de la sala.

Si partimos de la ecuación (2-10) para el periodo de extinción según el modelo de Sabine, cuando la densidad de energía \mathcal{E} haya disminuido a una millonésima parte, se cumplirá

$$10^{-6} = e^{-\frac{Ac}{4V}T_{60}} \Rightarrow -\frac{Ac}{4V}T_{60} = -6 \ln 10$$

de donde se puede despejar

$$T_{60} = \frac{24 \ln 10 V}{cA}$$

que, sustituyendo la velocidad del sonido en el aire $c = 340 \text{ ms}^{-1}$ da

$$T_{60} = \frac{0,162V}{A} \quad (2-23)$$

conocida como *fórmula de Sabine* para el tiempo de reverberación. Cuando es necesario tener en cuenta la absorción del aire, la expresión (2-23) queda

$$T_{60} = \frac{0,162V}{4a_I V + A} \quad (2-24)$$

Cuando, como es habitual, los recintos están formados por diversos materiales, cada uno de ellos de distinto coeficiente de absorción, Sabine consideró que la absorción sonora A del recinto debe venir dada por la suma de las absorciones sonoras de cada una de las superficies,

$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n.$$

Esto significa en la práctica tomar la absorción sonora como $S\bar{\alpha}$, donde $\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio del recinto tomado como la media aritmética de los coeficientes de absorción ponderada a la superficie cubierta por cada uno de los materiales (2-3).

Nótese que la expresión de Sabine es manifiestamente incorrecta para altas absorciones acústicas. En el caso extremo de todas las superficies perfectamente absorbentes, se tendría $\bar{\alpha} = 1$ en un recinto de dimensiones S y V dadas. Según la expresión de Sabine, en este caso el tiempo de reverberación sería $0,162V/S$ (y sería el mínimo que puede dar la expresión de Sabine), pero es evidente que el tiempo de reverberación real sería nulo, ya que ninguna reflexión volvería.

Por el contrario, para coeficientes de absorción bajos ($\alpha_i < 0,20$ para todas las superficies), como ocurre en los denominados “recintos vivos”, la fórmula de Sabine da bastante buen resultado.

2.3.2. Otras expresiones para el tiempo de reverberación.

La fórmula de Norris-Eyring

Eyring observó que la fórmula de Sabine no se cumple, como hemos comentado, cuando la absorción acústica es alta, sino que es esencialmente una expresión para recintos “vivos”. Su modelo (1933) da lugar a una expresión que es más general que la fórmula de Sabine.

Este modelo está basado en el análisis del recorrido libre medio entre sucesivas reflexiones. Como hemos visto, éste viene dado por la expresión

$$\bar{\ell} = \frac{c}{\bar{n}} = \frac{4V}{S} \quad (2-22)$$

y el número de reflexiones por segundo por

$$\langle n \rangle = \frac{cS}{4V}. \quad (2-21)$$

El sonido emitido por la fuente sufre sucesivas reflexiones en las paredes del recinto. En cada reflexión, la energía de la onda se reducirá en promedio en un factor $\langle \rho \rangle = (1 - \langle \alpha \rangle)$ donde $\langle \alpha \rangle$ es el coeficiente de absorción promediado a incidencias aleatorias sobre el área. Así, sobre un tiempo de reverberación T_{60} la energía se habrá atenuado hasta $(1 - \langle \alpha \rangle)^{\langle n \rangle T_{60}}$. Como esto debe corresponder a una atenuación de 60 dB en la densidad de energía, se cumplirá $\log(1 - \langle \alpha \rangle)^{\langle n \rangle T_{60}} = -60$ quedando el tiempo de reverberación como

$$T_{60} = \frac{0,162V}{-S \ln(1 - \langle \alpha \rangle)}, \quad (2-25)$$

expresión conocida como *fórmula de Norris y Eyring* para el tiempo de reverberación.

Podemos considerar esta expresión como similar a la fórmula de Sabine si tomamos la absorción sonora como

$$A_{Ey} = -S \ln(1 - \langle \alpha \rangle). \quad (2-26)$$

Para recintos muy reverberantes (y por tanto con superficies muy poco absorbentes acústicamente) podemos desarrollar en serie el logaritmo, quedando $\bar{\alpha} \simeq \langle \alpha \rangle$.

Por otra parte, para un recinto muy absorbente (con $\langle \alpha \rangle = 1$) se tiene $T_{60} = 0$ como sería de esperar.

Cuando es necesario tener en cuenta la absorción del aire, la expresión (2-25) pasa a ser de la forma

$$T_{60} = \frac{0,162V}{4a_I V - S \ln(1 - \langle \alpha \rangle)} \quad (2-27)$$

La fórmula de Eyring es preferible cuando los coeficientes de absorción de las superficies son relativamente uniformes y mayores de 0,20.

La fórmula de Millington-Sette

Millington observó que cuando se miden coeficientes de absorción de materiales muy absorbentes, la fórmula de Eyring llega a dar coeficientes de absorción mayores que la unidad. Millington (1934) desarrolló una variante del modelo anterior, donde se analizan por separado cada una de las superficies en vez de trabajar con el coeficiente de absorción promedio.

Así, la probabilidad de que una reflexión se produzca en una superficie será proporcional a la importancia relativa de la misma, esto es, a S_i/S_{tot} . De este modo, de N reflexiones, NS_i/S_{tot} se producirán en la superficie i , disminuyendo la energía en un factor $(1 - \alpha_i)^{NS_i/S_{tot}}$ debido a las reflexiones contra la superficie i , de coeficiente de absorción α_i y superficie S_i . Considerando las reflexiones sobre todas las superficies no equivalentes, el factor de disminución de la energía será

$$(1 - \alpha_1)^{\frac{S_1}{S_{tot}}N} \cdot (1 - \alpha_2)^{\frac{S_2}{S_{tot}}N} \dots (1 - \alpha_n)^{\frac{S_n}{S_{tot}}N}.$$

Como el número N de reflexiones en un tiempo t viene, a partir de (2-21), dado por

$$N = \frac{cS}{4V}t$$

la disminución de energía con el tiempo tendría lugar en la forma

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}(0) \left[(1 - \alpha_1)^{\frac{S_1 c}{4V}t} (1 - \alpha_2)^{\frac{S_2 c}{4V}t} \dots (1 - \alpha_n)^{\frac{S_n c}{4V}t} \right].$$

El tiempo de reverberación corresponderá entonces a una disminución de la energía en un 10^{-6} ,

$$[(1 - \alpha_1)^{S_1} (1 - \alpha_2)^{S_2} \dots (1 - \alpha_n)^{S_n}]^{\frac{cT_{60}}{4V}} = 10^{-6}.$$

Despejando el tiempo de reverberación se obtiene la *fórmula de Millington-Sette*

$$T_{60} = \frac{0,162V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2-28)$$

que tomando la absorción acústica como

$$A_{Mi} = -\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i) \quad (2-29)$$

tiene una forma similar a la expresión de Sabine. Considerando la absorción del aire, la fórmula de Millington toma la forma

$$T_{60} = \frac{0,162V}{4a_I V - \sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}. \quad (2-30)$$

Estas expresiones presentan un problema si alguno de los coeficientes de absorción de las superficies es igual a la unidad, como por ejemplo ocurre en una ventana abierta, con independencia del tamaño de la superficie S_i . Esto es una consecuencia de que el modelo considera en cada instante el promedio en el tiempo de la contribución de todas las superficies, por pequeñas que éstas sean. Como todos los rayos pasarán por la superficie problemática en algún momento, harán cero el cálculo en cualquier momento.

En cualquier caso, en el límite $\alpha_i \ll 1$, las expresiones anteriores se reducen a las de Sabine.

La fórmula de Millington es preferible cuando los coeficientes de absorción de las superficies no son uniformes y al menos uno de ellos es mayor de 0,20 (pero sin ser la unidad).

Las fórmulas de Fitzroy y Arau-Puchades

Fitzroy estudió experimentalmente el tiempo de reverberación en recintos donde la absorción es no uniforme, y observó que las fórmulas de Sabine y Eyring dan predicciones del tiempo de reverberación que a menudo discrepan claramente de los resultados experimentales. En general, las fórmulas anteriores infravaloran el tiempo de reverberación, especialmente en recintos muy absorbentes acústicamente en la dirección vertical, como ocurre cuando hay un techo acústico, o en un auditorio con la absorción sonora de los asistentes.

Fitzroy tiene en cuenta no sólo aspectos físicos, sino también geométricos, en el cálculo del tiempo de reverberación en un recinto prismático. Considerando que la energía tiende a fluir entre cada par de paredes opuestas y la absorción sonora promedio de cada una de estos pares de paredes, propuso una expresión empírica en la que se asume una distribución no uniforme de la absorción. Ésta es conocida como *fórmula de Fitzroy* para el tiempo de reverberación,

$$T_{60} = \frac{0,162V}{S} \left[\frac{S_x}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{S_y}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{S_z}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right] \quad (2-31)$$

o, para la absorción sonora

$$A_{\text{Fitz}} = S \left[\frac{S_x}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{S_y}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{S_z}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{-1}$$

donde cada una de las S_x, S_y, S_z representa la suma de las superficies (m^2) de cada par de paredes paralelas opuestas, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ sus coeficientes de absorción, S la superficie total del recinto (m^2) y V su volumen (m^3). En realidad esta expresión surge de un promedio aritmético a los tres pares de superficies de los valores del coeficiente de absorción dados por la fórmula de Eyring, ponderados por el área relativa.

Basándose en la idea de Fitzroy, Arau-Puchades[7] propuso una expresión en la que el tiempo de reverberación se obtiene como la media geométrica ponderada a las áreas de los tiempos de reverberación de Eyring en cada una de las direcciones rectangulares,

$$T_{60} = \left[\frac{0,162V}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{S_x/S} \cdot \left[\frac{0,162V}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{S_y/S} \cdot \left[\frac{0,162V}{4a_I V - S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{S_z/S} \quad (2-32)$$

donde $\bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y$ y $\bar{\alpha}_z$ son los coeficientes de absorción medios ponderados a las áreas en las superficies perpendiculares a las direcciones x, y y z y S_x, S_y y S_z las superficies totales de las mismas.

2.3.3. El tiempo de reverberación óptimo.

Dependiendo del destino del local a acondicionar acústicamente y de su volumen, se elegirán unos valores u otros del tiempo de reverberación. Sin embargo, no existe una definición única de *tiempo de reverberación óptimo* y los resultados presentados por distintos autores presentan frecuentes diferencias cuantitativas, aunque cualitativamente sean más similares. En general, la palabra requiere unos tiempos de reverberación menores que la música, ya que las consonantes son más débiles y cortas que las vocales. Así, si el tiempo de reverberación es grande, las vocales se extienden demasiado en el tiempo, enmascarando a las consonantes y perjudicando la inteligibilidad. Sin embargo, un tiempo de reverberación más grande favorece a la música, ya que da mayor continuidad a los sonidos, contribuye a disimular pequeñas imperfecciones en la ejecución musical y da una sensación más envolvente.

En la figura 2-5 se muestran unos rangos aproximados de valores del tiempo de reverberación óptimo, en función del volumen del local y de su uso previsto.

Además de las sugerencias que pueda dar la figura anterior, a menudo se utilizan distintas expresiones empíricas para calcular el tiempo de reverberación con el que se espera obtener la mayor calidad del sonido en el recinto a acondicionar.

Una de las expresiones empíricas que se utilizan es de la forma

$$T_{60}^{\text{opt}} = K_{\text{frec}} \cdot K_{\text{uso}} \cdot K_{\text{apoyo}} \sqrt[3]{V} \quad (2-33)$$

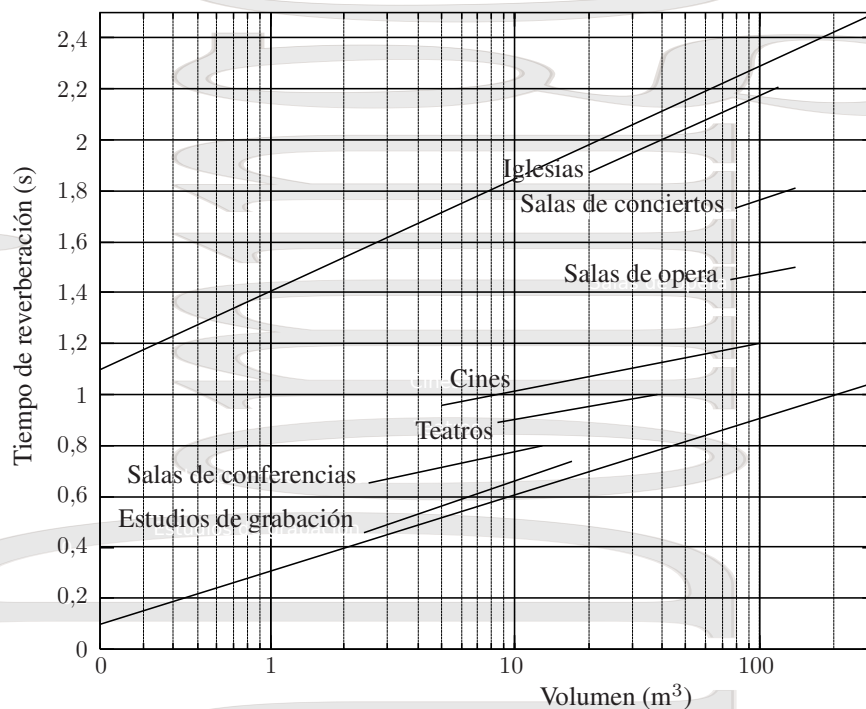


Figura 2-5: Valores habituales del tiempo de reverberación óptimo en función del volumen del local para distintos usos del mismo.

donde K_{frec} es un coeficiente que depende de la frecuencia (p.ej., es de 1,3 para 125 Hz y de 0,9 para 4 kHz), K_{uso} es un coeficiente que depende del uso del local (p.ej., es de 0,075 para palabra y de 0,10 para música), K_{apoyo} es un coeficiente que depende del apoyo electroacústico (p.ej., es de 1 sin apoyo y de 0,085 con apoyo, aunque depende de la intensidad del apoyo) y V es el volumen del recinto en m^3 . Esta expresión correspondería al local vacío y necesita un ajuste cuando se tiene en cuenta la absorción sonora de los ocupantes. Además de ésta hay toda una serie de expresiones empíricas, en algunos casos únicamente para un tipo de sala.

2.3.4. Otros parámetros de calidad acústica.

Aunque muy importante, el tiempo de reverberación no es el único parámetro a tener en cuenta a la hora de analizar la calidad acústica de un recinto. Por ejemplo, especialmente en salas pequeñas, pueden aparecer resonancias o ondas estacionarias a ciertas frecuencias como consecuencia de reflexiones sucesivas en paredes opuestas. Así, si el sonido contiene la frecuencia de la onda estacionaria, ésta parecerá amplificada por la habitación y para ésta el tiempo de reverberación parecerá mayor, distorsionándose el sonido.

La presencia de ondas estacionarias puede dar lugar a otro de los problemas que pueden aparecer, la no uniformidad del sonido en el recinto, es decir el nivel sonoro en unos puntos es distinto que en otros de una forma que no es atribuible únicamente al campo directo. También es conveniente evitar un exceso de direccionalidad derivado de las reflexiones especulares.

2.4. El campo acústico en un recinto

En cuanto al campo reflejado, la ecuación (2-7) nos da su valor de acuerdo con la aproximación de Sabine. Recordemos que en ese modelo la distribución de energía es isotrópica, por lo que en la práctica no debe incluirse nada del campo directo. De hecho, el efecto del campo directo ya se incluirá directamente en la expresión que viene a continuación. Por este motivo, a la hora de evaluar el campo reflejado debemos descontar la energía que se absorbe en la primera

Tabla 2-1: Características acústicas de algunos auditorios musicales.

Sala	$V \text{ (m}^3\text{)}$	$S_t \text{ (m}^2\text{)}$	Tiempos de reverberación (s)						Asientos
			125	250	500	1000	2000	4000	
Carnegie Hall (N. York)	24300	2000	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6	1,4	2800
Philharmonic Hall (N. York)	24400	-	-	-	1,90	-	-	-	-
Symphony Hall (Boston)	18700	1600	2,2	2,0	1,8	1,8	1,7	1,5	2600
Academy of Music (Filadelfia)	15700	1700	1,4	1,7	1,45	1,35	1,25	1,15	3000
St Andrew's Hall (Glasgow)	16100	1400	1,8	1,8	1,9	1,9	1,8	1,5	2800
Usher Hall (Edimburgo)	16000	-	-	-	1,65	-	-	-	-
Free Trade Hall (Manchester)	15000	-	-	-	1,6	-	-	-	-
Colston Hall (Bristol)	13500	1300	1,85	1,7	1,7	1,7	1,6	1,35	2200
Queen Elisabeth Hall (Londres)	10150	-	-	-	1,9	-	-	-	-
Royal Festival Hall (Londres)	22000	-	-	-	1,47	-	-	-	-
Neues Gewandhaus (Leipzig)	10600	1000	1,5	1,6	1,55	1,55	1,35	1,2	1600
Beethovenhalle (Bonn)	15700	-	-	-	1,7	-	-	-	-
Philharmonie (Berlin)	26000	-	-	-	2,0	-	-	-	-
Musichochschule (Berlin)	9600	-	-	-	1,65	-	-	-	-
Concertgebouw (Amsterdam)	18700	1300	2,2	2,0	2,1	1,9	1,8	1,6	2600
Binyanei Ha'oomah (Jerusalén)	24700	2400	2,2	2,0	1,75	1,75	1,65	1,5	3100
Grosser Musikvereinsaal (Viena)	15000	1100	2,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,6	1700
Plais des Beux Arts (Bruselas)	12500	1500	1,9	1,75	1,5	1,35	1,25	1,1	2200
Konserthus (Gotemburgo)	11900	1000	1,9	1,7	1,7	1,7	1,55	1,45	1400
Kongressitalo (Helsinki)	18000	-	-	-	1,7	-	-	-	-
Stadt Casino (Basilea)	10500	900	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1400
Kresge Auditorium (Cambridge, Mass.)	10000	1000	1,65	1,55	1,5	1,45	1,35	1,25	1200
Teatro Colón (Buenos Aires)	20600	2100	-	-	1,7	-	-	-	2800
Metropolitan Opera (N. York)	19500	2600	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	2800
Teatro alla Scala (Milán)	11200	1600	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	0,9	2500
Royal Opera House (Londres)	12300	-	-	-	1,2	-	-	-	-
Auditorio Nacional (Madrid)	22000	-	-	-	2,0	-	-	-	-
Sala de Cámara A. Nacional (Madrid)	4500	-	-	-	1,6	-	-	-	-
Auditorio Manuel de Falla (Granada)	10100	-	-	-	1,8	-	-	-	-

reflexión, si \dot{W} es la potencia de la fuente, la potencia entrante que dará el campo reflejado será $\dot{W}_{inc} = \dot{W}(1 - \bar{\alpha})$ quedando la densidad de energía correspondiente al mismo en la forma

$$\mathcal{E}(0) = \frac{4\dot{W}(1 - \bar{\alpha})}{Ac} = \frac{4\dot{W}}{Rc} \quad (2-34)$$

donde R es la constante de la sala dada por

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{A}{1 - \bar{\alpha}}. \quad (2-35)$$

En función de R , la amplitud eficaz de presión producida por el campo reflejado en régimen estacionario puede escribirse como

$$p_{ef}^2 = \frac{4\dot{W}\rho_0 c}{R} \quad (2-36)$$

y la intensidad equivalente como

$$I_{eq} = \frac{4\dot{W}}{R} \quad (2-37)$$

Para bajas absorciones puede escribirse

$$R \simeq S\bar{\alpha} \quad \text{con} \quad \bar{\alpha} \simeq \alpha_{sab} \quad (2-38)$$

La intensidad debida al campo directo en un punto a una distancia r de la fuente será, si ésta es omnidireccional, de la forma

$$I_{dir} = \frac{\dot{W}}{4\pi r^2}. \quad (2-39)$$

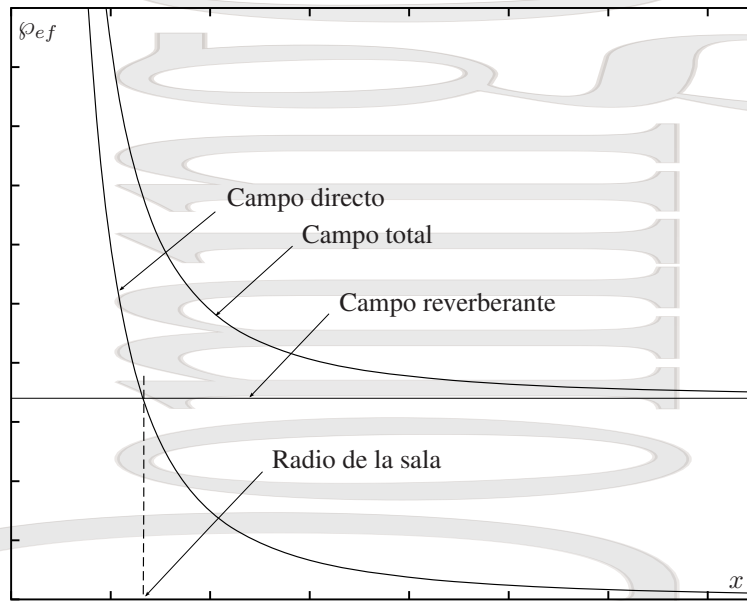


Figura 2-6: El radio de la sala es la distancia de la fuente a la que las contribuciones de campo directo y campo reverberante son iguales.

quedando el cuadrado de la presión efectiva total

$$p_{ef}^2 = \rho c I_{dir} + 4\rho c I_{eq} = \dot{W} \rho c \left[\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad (2-40)$$

para una fuente omnidireccional.

Para una fuente direccional el cuadrado de la presión efectiva total quedaría como

$$p_{ef}^2 = \rho c I_{dir\theta} + 4\rho c I_{eq} = \dot{W} \rho c \left[\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad (2-41)$$

Denominamos *radio de la sala* a la distancia de la fuente a la que las contribuciones de campo directo y campo reverberante son iguales.

2.5. Reducción del nivel sonoro

Denominamos reducción del nivel sonoro a la disminución en dB del nivel sonoro como consecuencia de un cambio en las características acústicas del recinto o de la fuente,

$$R = 10 \log \frac{I_i}{I_f} \quad (2-42)$$

Si la fuente sigue emitiendo dentro del recinto con la misma potencia y hemos cambiado las características de las superficies, la reducción del nivel sonoro del campo reverberante será

$$R = 10 \log \frac{I_i}{I_f} = 10 \log \frac{R_f}{R_i}. \quad (2-43)$$

Si la fuente de sonido es externa y hemos cambiado las superficies del recinto sin apenas cambiar la transmisión del sonido desde el exterior al interior, la reducción del nivel sonoro del campo reverberante será

$$R = 10 \log \frac{I_i}{I_f} = 10 \log \frac{A_f}{A_i}. \quad (2-44)$$

En el caso general, para calcular la reducción del nivel sonoro tendremos que tener en cuenta todas las contribuciones a dicha reducción: acondicionamiento de las superficies internas del recinto, aislamiento del exterior y distancia a la fuente.

2.6. Materiales acústicos y su disposición

Para acondicionar acústicamente un recinto es necesario combinar adecuadamente una serie de elementos. Los más importantes son las superficies reflectantes, las superficies difusoras, y los materiales y sistemas absorbentes.

Cuando la onda acústica incide sobre una superficie, puede producirse absorción (en el sentido de acondicionamiento acústico) o reflexión. La reflexión en la superficie externa es *reflexión regular* o *especular* cuando se cumple la *ley de Snell*, es decir, cuando el ángulo de la onda reflejada es el mismo que el ángulo de la onda incidente. Esto ocurrirá cuando las irregularidades y la textura de la superficie sean mucho menores que la longitud de onda del sonido incidente, es decir cuando la superficie sea relativamente lisa. La reflexión será *reflexión difusa* cuando no se cumple la ley de Snell y el sonido es reflejado más o menos aleatoriamente en todas las direcciones. Se producirá reflexión difusa cuando las irregularidades y la textura de la superficie sean del orden de la longitud de onda del sonido incidente, es decir, cuando la superficie sea rugosa en la escala del sonido incidente. Cuando la longitud de onda es mucho menor que las irregularidades, cada una de éstas se comportará en la práctica como una superficie lisa produciéndose reflexiones especulares en cada una de ellas, originándose una reflexión neta en distintas direcciones.

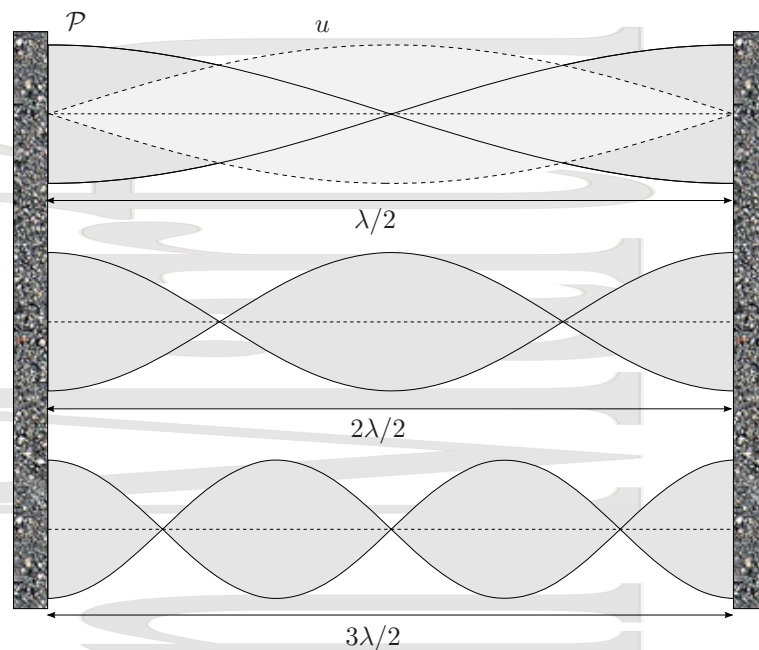


Figura 2-7: Amplitud de la onda de presión para algunas posibles ondas estacionarias entre dos paredes paralelas, cuando la longitud de onda es tal que la distancia entre las paredes es de 1, 2 y 3 semilongitudes de onda. En todos los casos, la distancia entre nodos es una semilongitud de onda. Para el caso del modo principal (con 1 semilongitud de onda entre las paredes) también se muestra la onda estacionaria de desplazamiento. Nótese que el desplazamiento es nulo en contacto con las paredes. La amplitud de la onda de presión (que es realmente lo que se detecta) es máxima en los puntos en los que la amplitud de la onda de desplazamiento es nula.

La reflexión del sonido puede ser buena o mala. Por una parte puede hacer que el sonido resulte más agradable y que además refuerce zonas en las que el campo directo se hace pequeño. Sin embargo, también puede dar lugar a la formación de *ondas estacionarias* de forma que en algunas zonas ciertas frecuencias sufren un refuerzo mientras que otras se produce una atenuación. Estas ondas aparecen para frecuencias tales que la distancia entre dos superficies paralelas es un múltiplo entero de semilongitudes de onda. Además de estas ondas estacionarias pueden producirse otras más complejas que implican un mayor número de reflexiones, pero que afectan mucho menos al sonido resultante.

2.6.1. Reflectores acústicos

Los *reflectores acústicos* se utilizan para conseguir que el sonido reflejado refuerce al directo. Están diseñados especialmente para producir reflexiones (en particular primeras reflexiones) dirigidas hacia las zonas que deben ser reforzadas, mejorándose de esta forma la eficiencia acústica del recinto. Así, es frecuente colocar reflectores acústicos (denominados también *tornavoces*) detrás del escenario para reforzar el sonido saliente hacia los espectadores.

No todos los tipos de salas ni todos los tipos de usos se benefician de la presencia de reflectores acústicos. En particular, éstos son útiles y en ocasiones necesarios, en recintos dedicados a la palabra (sin megafonía) y a la música no amplificada.

La geometría de los reflectores puede ser tanto plana como curva y se construyen con materiales lisos no porosos y rígidos, intentándose que sean capaces de reflejar la mayor parte de la energía acústica incidente.

El uso de reflectores acústicos en los teatros es habitual ya desde la época de los teatros griegos abiertos al aire libre, en los que se utilizaba la parte posterior del escenario, la *escena* u *orchestra* (el círculo de arena donde estaban los actores), y las propias gradas como reflectores acústicos. Esto permitió unas propiedades acústicas excepcionales incluso en grandes teatros.

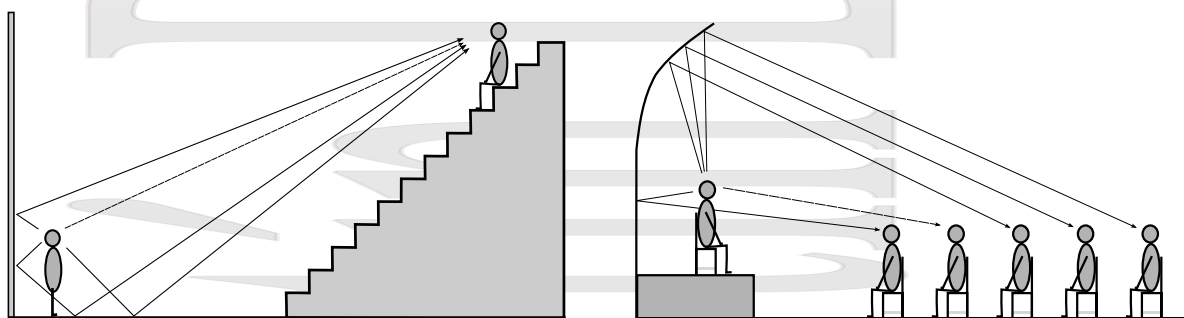


Figura 2-8: Refuerzo del sonido directo mediante sonido reflejado en la estructura típica de un teatro clásico y en la de un teatro moderno de interior.

El mejor ejemplo de esto es el teatro griego de Epidauro, construido para 14,000 espectadores en un desnivel natural del terreno, con una *orchestra* circular de casi 20 m de diámetro, en el que los espectadores de las filas superiores podían oír perfectamente a los actores en la escena. En realidad, la acústica del teatro de Epidauro tiene, junto con la reflexión, una contribución muy importante de la difusión. Las gradas actúan (debido a su periodicidad) como una gran red de difracción para las bajas frecuencias, que se difunden, mientras que apenas afectan a las altas frecuencias. Así, se tiene un filtro acústico que debilita las bajas frecuencias, componente principal del ruido de fondo, y se refuerza la audibilidad de las voces de los actores.

2.6.2. Difusores acústicos

Un problema importante a resolver a la hora de acondicionar acústicamente un local, especialmente con salas de música, consiste en la creación de un campo sonoro muy difuso, de forma que el sonido sea envolvente. Para ello se requiere evitar en lo posible las ondas estacionarias y las reflexiones especulares en algunas superficies, evitándose los ecos intensos, y distribuir el sonido en la sala de una forma lo más uniforme posible. Ésta es la misión de los *difusores acústicos*.

Los difusores son un excelente complemento a los sistemas absorbentes, ya que disipan mucha menos energía y por tanto permiten atenuar ecos y ondas estacionarias manteniendo al mismo tiempo un recinto vivo. Frente a los reflectores tienen la ventaja de un reparto más uniforme del sonido, aunque cada uno tiene su uso.

En los teatros antiguos la difusión se lograba mediante balcones, estatuas, adornos, etc. Esto, sin embargo, resultaría muy costoso y poco estético para los gustos actuales. En su lugar se han diseñado distintos dispositivos de dispersión

controlada del sonido basados en paneles de ciertas geometrías o con distintos acabados de las superficies, que además ayudan a prevenir la aparición de ondas estacionarias.

El difusor más sencillo y fácil de realizar es el hecho con los famosos cartones de huevo. Éstos se comportan como difusores por su geometría y como absorbentes por su material (si son los de cartón, no los de plástico). Asimismo, una librería con libros de tamaños variados actúa como un difusor del sonido. Las paredes con superficies irregulares como picado, gotelé, etc también actúan como difusor y ayudan a prevenir la aparición de ondas estacionarias, sobre todo de altas frecuencias, al ser menores sus longitudes de onda.

Sin embargo, para que un difusor alcance su máxima eficiencia se requieren diseños específicos en función de las frecuencias y de las salas para las que están proyectados.

Existen sofisticados diseños de difusores acústicos optimizados para obtener un alto rendimiento. Quizás los más conocidos son los difusores de residuos cuadráticos de Schroeder[8, 9]. Estos difusores consisten en reflectores colocados en el fondo de acanaladuras a distintas profundidades. Los distintos valores de éstas hacen que la reflexión del sonido total se produzca con una serie de diferencias de fase (para cada rendija es el doble de la profundidad respecto de la onda entrante) que pueden intentar ajustarse de acuerdo con la denominada secuencia de residuos cuadráticos de un número primo para que el resultado tenga las propiedades direccionales deseadas. De esta forma, una superficie compuesta de elementos reflectantes se comporta como una superficie difusora.

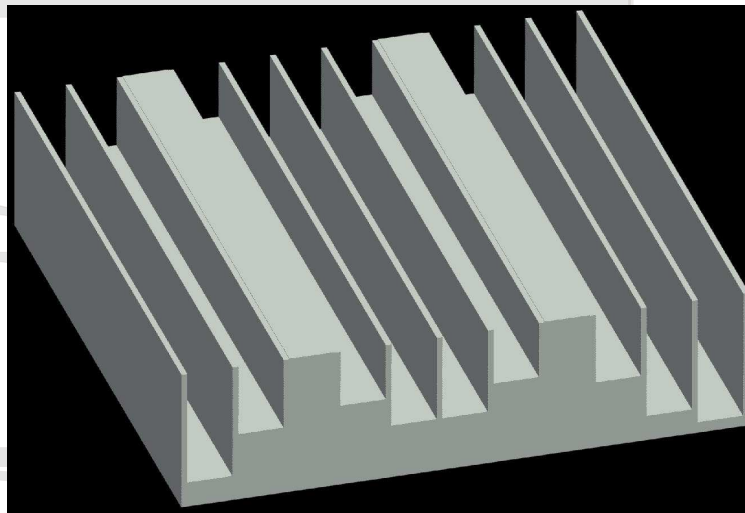


Figura 2-9: Esquema de un difusor de residuos cuadráticos.

A lo largo del tiempo se ha realizado una intensa investigación en este terreno y se han propuesto una serie de variantes en la secuencia a utilizar. Asimismo, además del difusor unidimensional que se ha descrito, se han realizado difusores bidimensionales. Otros diseños incluyen una distribución semi-aleatoria de superficies absorbentes y reflectantes o de acanaladuras dentro de acanaladuras (de una forma inspirada en las estructuras fractales) para ser eficiente en un mayor rango de frecuencias.

2.6.3. Materiales y sistemas absorbentes

La absorción acústica tiene lugar en último término mediante disipación de energía en forma de calor, asociada a procesos de fricción, que pueden estar o no asociados a una resonancia.

Los sistemas absorbentes son esencialmente de dos tipos, absorbentes disipativos o porosos y resonadores. En los absorbentes porosos, cuando la onda acústica pasa por un medio poroso abierto, produce movimiento de las partículas de aire en el mismo, que fluyen a través de los microcanales del medio con un rozamiento similar al del movimiento de un fluido en una tubería, produciéndose disipación de energía. En el caso de resonadores habituales, se tiene un sistema del tipo masa-muelle formado por una cavidad que contiene aire y una masa que puede ser bien aire o un

panel, disipándose energía en el movimiento. Existen dos tipos básicos de resonadores, los resonadores de Helmholtz y los resonadores de membrana.

Absorbentes disipativos

En los *materiales porosos* o fibrosos la disipación de energía tiene lugar como consecuencia de las fluctuaciones de presión en la superficie del material que bombean aire hacia dentro y hacia fuera del mismo. El sonido se propaga a través de la red de poros interconectados de forma que por una parte la fricción viscosa del aire al moverse por los microcanales del material y el rozamiento entre las fibras del material que se muevan bajo la acción de la onda acústica producen disipación de energía de la misma en forma de calor. Por otra parte, las cavidades interiores que tengan una única boca actuarán como cavidades resonantes de forma similar al resonador de Helmholtz que veremos a continuación.

Materiales porosos típicos son alfombras, cortinas y tejidos gruesos, lana mineral y fibra de vidrio y algunas espumas acústicas como las de poliuretano (las de estructura abierta de poros). Nótese que para que un material poroso sea eficaz es necesario que los microcanales estén interconectados y, por tanto, es necesaria una estructura abierta de poros.

Para el caso de las cavidades internas, los materiales porosos serán más efectivos en la absorción de las altas frecuencias, en especial para longitudes de onda comparables al tamaño de los poros y menores. Sin embargo se produce también buena absorción para longitudes de onda mayores, ya que se tiene además el proceso de disipación de energía por flujo viscoso del aire a través de los microcanales, que es importante para materiales suficientemente gruesos.

La efectividad global dependerá no sólo del material, sino además de la relación entre el espesor del mismo y la longitud de onda del sonido. En efecto, para que el absorbente poroso sea efectivo necesita estar en donde la velocidad de las partículas sea alta. Como la velocidad de las partículas en los límites rígidos del recinto es normalmente nula (aunque la presión sea máxima), se producirá poca absorción junto a esta superficie. Zonas del absorbente más alejadas de la superficie rígida darán lugar a mejores absorciones si están en una zona de elevado movimiento de las partículas, y por esto, será necesario tener un cierto espesor de absorbente. Para bajas frecuencias, de longitud de onda grande, puede ser necesario alejarse mucho de la pared rígida para encontrar el máximo de movimiento de las partículas. Por este motivo es difícil obtener buena absorción a bajas frecuencias con materiales porosos, ya que para ello debieran ser gruesos, además de buenos absorbentes.

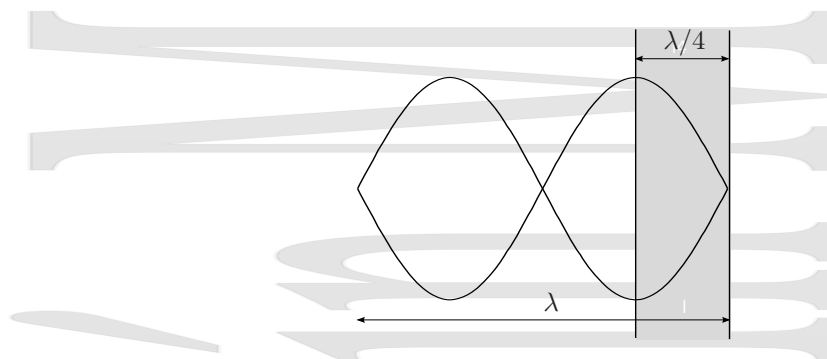


Figura 2-10: Dependencia de la absorción de un material poroso con el espesor del mismo. La máxima velocidad de las partículas del aire se producirá a un cuarto de longitud de onda de la pared.

Para que a una frecuencia la absorción sea mínimamente eficaz debe cumplirse que el espesor del material sea al menos de una décima parte de la longitud de onda, mientras que para que sea muy eficaz debe ser de al menos un cuarto de longitud de onda. Dicho de otra forma, la menor frecuencia que puede absorberse eficazmente en un material poroso debe tener una longitud de onda de como mucho 4 veces el espesor del absorbente, aunque si no pasa de 10 veces el espesor aún habrá una cierta absorción. Una fina capa de pintura absorbente no producirá apenas absorción. Por el contrario es posible obtener una mayor absorción simplemente colocando absorbentes porosos de forma adecuada fuera de las paredes.

También hay que tener en cuenta el acabado de la superficie. De nada sirve tener un material grueso muy absorbente si



Figura 2-11: Esquema del resonador de Helmholtz y algunos instrumentos musicales (ocarinas) que funcionan como un resonador de Helmholtz. Fotografía de las ocarinas por Asahiko cedida al dominio público.

la superficie se va a tratar con un acabado reflectante. En general el acabado ha de ser una película muy tenue esparcida mediante pulverización.

Otro factor que hay que tener en cuenta es la reflexión que puede producirse en la superficie porosa externa del material absorbente. Si ésta es rugosa, se favorece la absorción de altas frecuencias, que son más propensas a tener reflexiones especulares múltiples con sus correspondientes absorciones en las propias irregularidades de la superficie.

Cuando se quiere tener un recinto con un coeficiente de absorción próximo a la unidad para todas las bandas de frecuencia hay que cuidar además la forma de la superficie. Esto es lo que se hace en las *cámaras anecoicas*, donde la superficie se hace en forma de cuñas anecoicas, actuando como una trampa acústica, ya que el sonido que incide sobre la superficie de una cuña pasa por una serie de reflexiones sucesivas entre ésta y las contiguas, con un gran aumento de la superficie efectiva y por tanto de la absorción.

Resonadores de cavidad

Un *resonador de Helmholtz* está formado por una cavidad con una entrada en forma de cuello (Fig.2-11). Una botella de cristal vacía o semivacía es un ejemplo de resonador de Helmholtz. Cuando se sopla adecuadamente en su borde, el aire resuena a una frecuencia característica, dada por las dimensiones de la parte vacía de la botella y del cuello. Esta frecuencia es tanto mayor cuanto más llena se encuentre la botella, porque el volumen de aire en su interior es en este caso menor. El mismo fenómeno se observa silbando o en varios instrumentos musicales como la ocarina. Para que funcione bien las paredes de la cavidad deben ser razonablemente rígidas (al silbar tensamos la boca) y las dimensiones del resonador deben ser pequeñas comparadas con la longitud de onda del modo propio.

Estos resonadores pueden modelizarse como un sistema masa-muelle con una fuerza recuperadora. El aire dentro de la cavidad intenta expandirse al ser comprimido, por lo que se modeliza como un muelle, que hace oscilar a la masa de aire en el cuello del resonador. Si suponemos que el aire de la cavidad se comporta como un gas ideal y que la compresión/expansión es rápida, el proceso será aproximadamente adiabático, con una ecuación

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma = \text{cte}$$

donde p es la presión absoluta del gas, V su volumen, γ el índice adiabático y p_0 y V_0 los valores de presión y volumen en el equilibrio. Si diferenciamos la ecuación anterior, se tiene

$$V^\gamma dp + p\gamma V^{(\gamma-1)} dV = 0$$

que puede escribirse como

$$dp = -\frac{p\gamma}{V} dV.$$

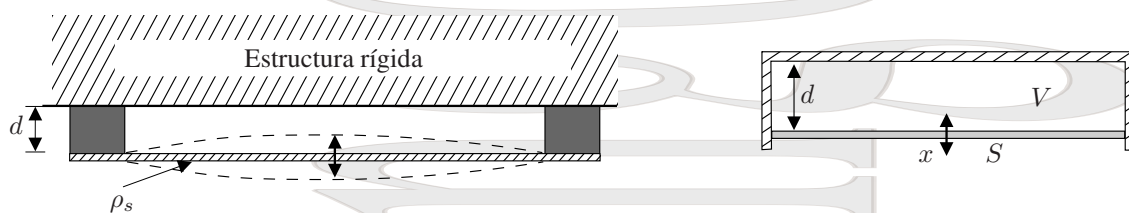


Figura 2-12: Un absorbente elástico o de membrana está compuesto por un panel oscilante de densidad superficial de masa ρ_s montado a una cierta distancia d de la pared rígida entre dos soportes separados por una distancia l entre sí.

Si multiplicamos por la superficie interna del cuello S y escribimos dV como Sdx , ésta ecuación queda en la forma

$$Sdp = -\frac{p\gamma S^2}{V}dx \simeq -\frac{p_0\gamma S^2}{V_0}dx$$

que, al ser Sdp la fuerza recuperadora y dx el desplazamiento ante el que reacciona, nos da una constante recuperadora

$$k_{res} = \frac{p_0\gamma S^2}{V_0}$$

y, por tanto, el cuadrado de la frecuencia angular natural de oscilación es

$$\omega_0^2 = \frac{k_{res}}{m} = \frac{p_0\gamma S^2/V_0}{\rho_0 Sl} = \frac{c^2 S}{V_0 l} \quad (2-45)$$

donde se ha tenido en cuenta que la velocidad del sonido en el aire es, para un proceso adiabático, de la forma

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}. \quad (2-46)$$

Finalmente obtenemos el valor de la frecuencia natural de oscilación del resonador de Helmholtz.[†]

$$\nu_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV_0}}. \quad (2-47)$$

En realidad no se utiliza la longitud l del cuello, sino una longitud efectiva l_e mayor que l que depende de la forma en que el cuello está terminado. Esta es típicamente de la forma $l + K \cdot r$ donde r es el radio del cuello y K un parámetro que varía entre 1,3 y 1,7.

Absorbentes elásticos o de membrana

Cualquier panel flexible que oscila en respuesta al sonido incidente transmitirá parte de la energía sonora a la otra parte y por tanto el sonido reflejado disminuirá. Parte de la energía sonora se transforma en mecánica y térmica y otra se absorbe en el rozamiento de las partículas de aire en la cámara, entre el panel y la pared.

Un modelo muy simplificado del problema consistiría en considerar el sistema como un panel rígido que se puede desplazar como un émbolo que oscila acercándose y alejándose de la pared. Así, se tendría un sistema resonante de masa $\rho_s S$ que se mueve bajo la acción del cambio de presión del aire contenido detrás del panel. El tratamiento de este problema es similar al que se ha utilizado para el resonador de Helmholtz, con una masa $m = \rho_s S$ y un volumen de aire $V_0 = Sd$, por lo que la ecuación (2-45) queda

$$\omega_0^2 = \frac{k_{res}}{m} = \frac{p_0\gamma S^2/V_0}{\rho_s S} = \frac{c^2 \rho_0}{\rho_s d} \quad (2-48)$$

teniendo en cuenta la forma (2-46) de la velocidad del sonido en el aire considerando que el proceso es adiabático. Así, la frecuencia de resonancia queda

$$\nu_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_s d}} \simeq \frac{60}{\sqrt{\rho_s d}} \quad (2-49)$$

[†] Aunque hemos hecho el análisis para un proceso adiabático, se habría obtenido el mismo resultado para un proceso isoterma.

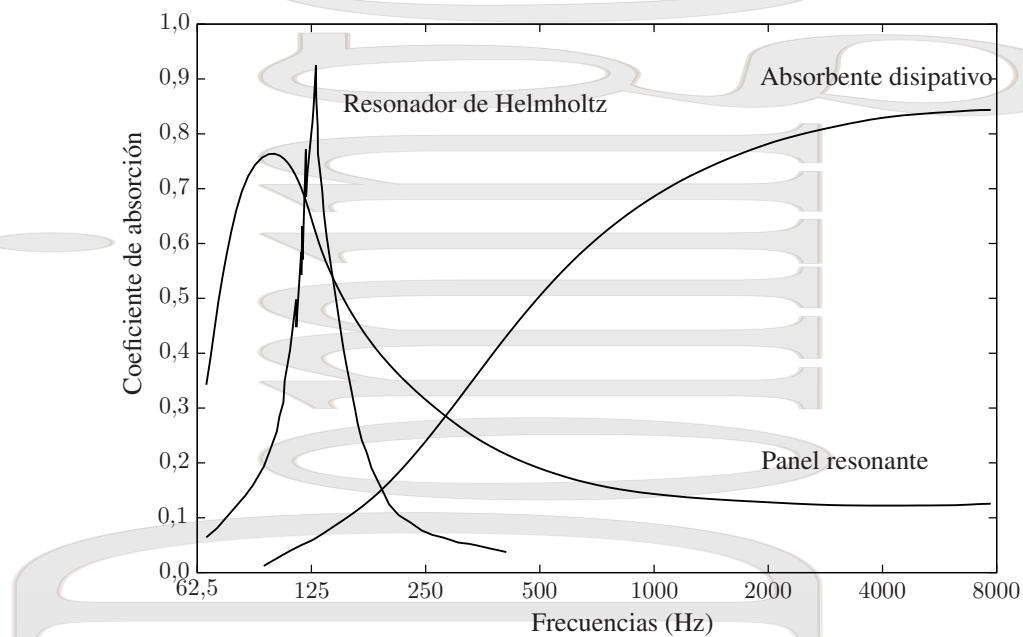


Figura 2-13: Los distintos tipos de absorbentes acústicos tienen su mayor absorción en distintas regiones del espectro acústico.

cuando se tienen en cuenta los valores (en el sistema internacional) de la densidad del aire y de la velocidad del sonido en el mismo a temperatura ambiente. El hecho de que hayamos introducido esos valores en el sistema internacional implica que también deben darse en el sistema internacional los valores de la densidad superficial de masa del panel ρ_s (kg/m^2) y de la distancia del mismo a la pared d (m), obteniéndose ν en Hz.

Nótese que en esta aproximación se han despreciado las fuerzas de recuperación elástica (de flexión) a que está sometido el panel como consecuencia de su deformación y se ha considerado que el cambio de volumen tiene lugar con el panel manteniéndose plano. En realidad el panel oscilará en su modo fundamental, de forma parecida a como se muestra en la figura 2-12 y, para que la aproximación no sea mala, será necesario que la densidad superficial del panel sea pequeña, que la distancia entre listones sea grande y/o que el módulo de Young del panel sea pequeño.

Estos absorbentes son más eficaces a bajas frecuencias, y es precisamente ahí donde la absorción es normalmente deseable y donde a menudo, ésta es la única forma de conseguirlo. En las frecuencias donde la absorción es baja, este tipo de paneles actúan como difusores.

Nótese que existen distintas combinaciones de densidad superficial del panel y distancia a la pared que darán la misma frecuencia de resonancia. Sin embargo los sistemas no serán completamente equivalentes ya que cambiarán la intensidad y anchura de la resonancia. Por ejemplo, un panel ligero a una distancia más grande de la pared dará una resonancia más intensa y más estrecha que un panel más pesado y más próximo a la pared, aunque ambos tengan la misma frecuencia de resonancia.

Sistemas mixtos

Otros sistemas combinan distintos tipos de absorbentes o con pequeñas modificaciones pasan a funcionar como otro tipo de absorbente. Éste es el caso de los paneles perforados como el que se muestra en la figura 2-14, que en vez de oscilar como un panel se comporta como una serie de resonadores de Helmholtz con el orificio de cuello, cada uno de ellos de volumen V y longitud de cuello el espesor del panel.

Tanto los resonadores de membrana como los resonadores de Helmholtz son muy eficaces, pero en un rango de frecuencias estrecho. Para aumentar el rango de frecuencias en el que el resonador es eficaz se puede combinar el resonador con un absorbente disipativo, como se muestra en la figura 2-15 para el caso de un panel perforado.

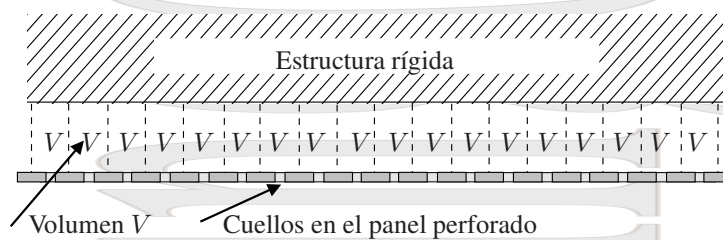


Figura 2-14: Un panel perforado se comporta como una serie de resonadores de Helmholtz, cada uno de volumen V y longitud de cuello el espesor del panel.

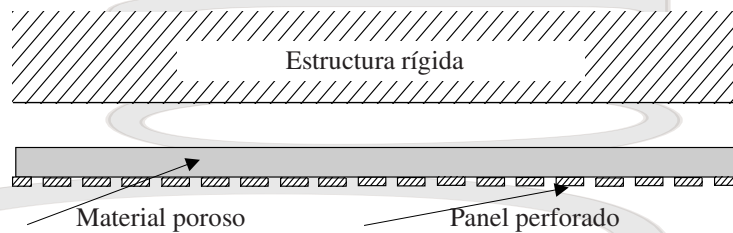


Figura 2-15: Para mejorar la respuesta en frecuencias de un panel perforado puede incluirse en su interior un absorbente poroso.

La contrapartida es que la eficacia a la frecuencia de resonancia disminuye. Obsérvese en la figura que el material absorbente se coloca desde la boca del resonador hacia el interior para cubrir la zona en la que la velocidad de las partículas es máxima.

A la hora de estimar la eficiencia de un panel perforado combinado con un absorbente poroso es necesario tener en cuenta no sólo el tamaño de las perforaciones, el volumen equivalente de cada resonador y el tipo de absorbente poroso, sino que también es necesario tener en cuenta la densidad de perforaciones. En un panel con pocas perforaciones, el comportamiento será próximo al de una membrana resonante sin perforar, mientras que en un panel con muchas perforaciones el comportamiento será próximo al del absorbente poroso.

Trampas de graves

Veamos ahora un caso particular de sistemas en general mixtos, las denominadas *trampas de graves*. En realidad las trampas de graves no añaden gran cosa a los sistemas absorbentes que ya hemos visto, salvo que están optimizadas para tener especial absorción en las frecuencias bajas (graves) habitualmente asociadas a ondas estacionarias. Normalmente se colocan estas trampas en las esquinas del recinto, donde la presión de las ondas estacionarias es máxima, y tras los altavoces.

Las trampas de graves son uno de estos sistemas absorbentes que actúan como resonadores, pero en un rango de frecuencias más amplio (a costa de una menor atenuación). Para ello rellenan parcialmente su cavidad hueca con materiales absorbentes. Estas trampas se colocan normalmente en las esquinas del recinto, donde la presión de las ondas estacionarias es máxima, y tras los altavoces.

La trampas de graves comerciales tienen distintos diseños, desde resonadores mixtos de forma cilíndrica, a absorbentes disipativos de distintas geometría.

2.6.4. Algunas normas genéricas de diseño.

1. Para tener el máximo efecto en la absorción del recinto (y por tanto en el tiempo de reverberación) es conveniente empezar a añadir materiales absorbentes en primer lugar a las superficies que son menos absorbentes.
2. Es conveniente distribuir los absorbentes por el recinto para minimizar efectos locales.

Tabla 2-2: Coeficientes de absorción de distintos materiales y elementos absorbentes en función de la frecuencia.

Material	α a distintas frecuencias					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón liso sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón liso pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Hormigón basto	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Ladrillo no esmaltado sin pintar	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Ladrillo no esmaltado pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Vidrio ordinario (4 mm)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Vidrio pesado	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cortina 338 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m ² fruncida al 50 %	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Cortina 475 g/m ² fruncida al 50 %	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Terrazo	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02
Linóleo, asfalto, caucho o corcho liso sobre hormigón.	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Parquet sobre hormigón	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Madera sobre listones	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Alfombra pesada sobre hormigón	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Alfombra pesada sobre espuma de caucho	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alfombra pesada sobre espuma de caucho con base de latex	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63
Placa de yeso/escayola de 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Contrachapado de 1 cm	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Mortero, yeso o cal con acabado liso sobre baldosa o ladrillo	0,013	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05
Mortero, yeso o cal con acabado rugoso sobre malla	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
Mortero, yeso o cal con acabado liso sobre malla	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Superficie del agua (piscina)	0,008	0,008	0,013	0,015	0,02	0,025
Elemento	A (sab) a distintas frecuencias					
Asiento tapizado ocupado	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
Banco de madera ocupado	0,57	0,61	0,75	0,86	0,91	0,86
Asiento tapizado vacío	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Silla de madera o metal vacía	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,30
Adulto de pie	0,25	0,35	0,42	0,46	0,50	0,50

3. Evitar la simetría. Si el recinto es de base rectangular, que al menos los lados sean de distinta longitud, aunque en general es mejor evitar paredes completamente paralelas para dificultar la formación de ondas estacionarias y acoplamientos, especialmente si ambas paredes son muy reflectantes. En particular, una forma cúbica es especialmente problemática. Si no se puede evitar, cubrir con material absorbente al menos una de cada dos paredes paralelas o colocar un recubrimiento difusor.
4. Es difícil conseguir absorción a bajas frecuencias con materiales porosos de espesor normal. Para que sean efectivos a bajas frecuencias, los materiales porosos deben ser gruesos.
5. Se puede aumentar la absorción a bajas frecuencias de los materiales porosos montándolos con una pequeña cámara de aire detrás. Así tienen un pequeño comportamiento como resonadores de panel y están en la zona en la que la velocidad de las partículas es máxima.
6. Normalmente es deseable poner materiales absorbentes o difusores en la pared opuesta a la fuente de sonido.

Acústica Arquitectónica

Referencias

- [1] Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens y J. V. Sanders, *Fundamentos de acústica*. Limusa, México, 1995.
- [2] Díaz Sanchidrián, C., *Apuntes de Acústica en la Edificación y el Urbanismo*. Cuadernos de apoyo a la docencia, Instituto Juan de Herrera, ETSAM, Madrid, 2002, 6 Vols.
- [3] Llinares, J., A. Llopis y J. Sancho, *Acústica arquitectónica y urbanística*. Servicio de Publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1991.
- [4] Miyara, F., *Acústica y Sistemas de Sonido*. UNR Editora, Rosario, Argentina, 1999.
- [5] Martín Domingo, A., *Vibraciones y Ondas II: Movimiento ondulatorio*, vol. 249 de *Cuadernos de apoyo a la docencia*. Instituto Juan de Herrera, ETSAM, Madrid, 2008.
- [6] Stephens, R. W. B. y A. E. Bate, *Acoustics and Vibrational Physics*. Edward Arnold Ltd, Londres, 2^a edición, 1966, pag. 360.
- [7] Arau-Puchades, H., *Acustica* **65**, 163–180, 1988.
- [8] Schroeder, M. R., *J. Acoust. Soc. Am.* **57**, 149–150, 1975.
- [9] Schroeder, M. R., *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 958–963, 1979.

Índice alfabético

A

absorbente

- disipativo, 40
- elástico, 42
- poroso, 40

absorción

- coeficiente de, 22
- sonora
 - de Millington-Sette, 32
 - de Norris-Eyring, 31
 - de Sabine, 25, 31

acústica, 1

ancho de banda, 4

Arau-Puchades

- fórmula de, 33
- tiempo de reverberación de, 33

B

banda

- de doceavo de octava, 4
- de octava, 3
- de tercios de octava, 4

C

cámara anecoica, 41

campo

- difuso, 23
- directo, 22, 23
- perfectamente difuso, 23
- reflejado, 23
- reverberante, 23

coeficiente

- de absorción, 22
- del medio, 28
- promedio, 22
- de directividad, 12
- de transmisión, 22

constante

- de la sala, 35
- de tiempo, 26

criterio

- acústico, 4
- fisiológico, 4
- matemático, 4
- musical, 5

D

difusores acústicos, 38

E

eco, 23

- múltiple, 23

enmascaramiento, 20

F

Fitzroy

- fórmula de, 33
- tiempo de reverberación de, 33

fonio, 14

fórmula

- de Arau-Puchades, 33

de Fitzroy, 33

de Millington-Sette, 32

de Norris y Eyring, 31

de Sabine, 31

frecuencia

- central, 4
- inferior, 4
- superior, 4

fuerza

- direccional, 12
- omnidireccional, 12

G

ganancia acústica, 7

H

Helmholtz, resonador de, 41

I

impedancia acústica específica, 12

índice de directividad, 13

infrasonidos, 2

L

ley de Snell, 37

líneas

- isofónicas, 15
- isosónicas, 16

M

Millington-Sette

absorción sonora, 32

fórmula de, 32

tiempo de reverberación de, 32

N

nivel

continuo equivalente, 10

de exposición sonora, 11

de intensidad, 6

de potencia acústica, 6

de presión, 6

de sonoridad, 14

percentil, 11

sonoro

A, 19

B, 19

C, 19

Norris y Eyring

absorción sonora de, 31

fórmula de, 31

tiempo de reverberación de, 31

O

ondas

coherentes, 7

correlacionadas, 7

estacionarias, 37

incoherentes, 7

no correlacionadas, 7

sonoras, 1

P

- periodo
 - de establecimiento, 23, 26
 - de extinción, 23, 25
- psicoacústica, 13

R

- radio de la sala, 36
- recorrido libre medio, 29
- reflectores acústicos, 38
- reflexión
 - difusa, 37
 - regular, 37
- reflexiones tempranas, 23
- régimen
 - estacionario, 23, 25

resonador

- de Helmholtz, 41
- de membrana, 42
- elástico, 42

reverberación, 23, 30

- tiempo de, 30
 - Arau-Puchades, 33
 - Fitzroy, 33
 - Millington-Sette, 32
 - Norris-Eyring, 31
 - Sabine, 31

ruido, 3

- blanco, 9
- constante, 9
- continuo, 9
- de fondo, 8
- de impacto, 9
- fluctuante, 9

- marrón, 10
- rosa, 10
- transitorio, 9

S**Sabine**

- absorción sonora de, 31
- fórmula de, 31
- tiempo de reverberación de, 31

semitono, 5**son, 16****sonido**

- aéreo, 2
- estructural, 2

sonio, 16**sonoridad, 14****T****tiempo**

- constante de, 26
- de reverberación, 30
 - fórmula de Arau-Puchades, 33
 - fórmula de Fitzroy, 33
 - fórmula de Millington-Sette, 32
 - fórmula de Norris-Eyring, 31
 - fórmula de Sabine, 31
- óptimo, 33

tono puro, 2**tornavoces, 38****trampas de graves, 44****U****ultrasonidos, 2**

Glosario de términos

Acústica	Rama de la Física que estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción y reproducción del sonido.
Eco	Sonido reflejado con el suficiente retardo para ser percibido de forma separada del original.
Infrasonido	Sonido de frecuencia por debajo de 20 Hz.
Membrana basilar	Membrana situada en el interior de la cóclea, responsable de la respuesta en frecuencia del oído humano.
Ruido aéreo	Ruido que se propaga por el aire.
Ruido estructural	Ruido que se transmite a través de la estructura del edificio.
Sonido	Variación de la presión en un medio elástico que se propaga en el espacio.
Tono puro	Sonido compuesto de una única frecuencia.
Ultrasonido	Sonido de frecuencia superior a 20 kHz.